Le galassie costituiscono i laboratori astrofisici nei quali è possibile verificare l'influenza delle condizioni del mezzo interstellare nella generazione di stelle

di Jordi Cepa Nogué

La formazione di stelle nelle galassie a spirale

Volgendo lo sguardo al cielo, l'uomo si rese presto conto che nel firmamento notturno non brillavano solo stelle, ma si potevano scorgere strutture nebulose. Anche a occhio nudo, infatti, si ammirano la nebulosa di Orione, nella «daga» di Orione, e la nebulosa di Andromeda, nella costellazione omonima.

Il telescopio a rifrazione, inventato nel 1608, il telescopio riflettore, ideato nel 1672, e le loro successive versioni migliorate, permisero di moltiplicare il numero degli oggetti nebulosi «in catalogo». Nel 1781 Charles Messier aveva catalogato oltre 100 oggetti dall'aspetto diffuso; 20 anni più tardi William Herschel ne contava oltre 2500.

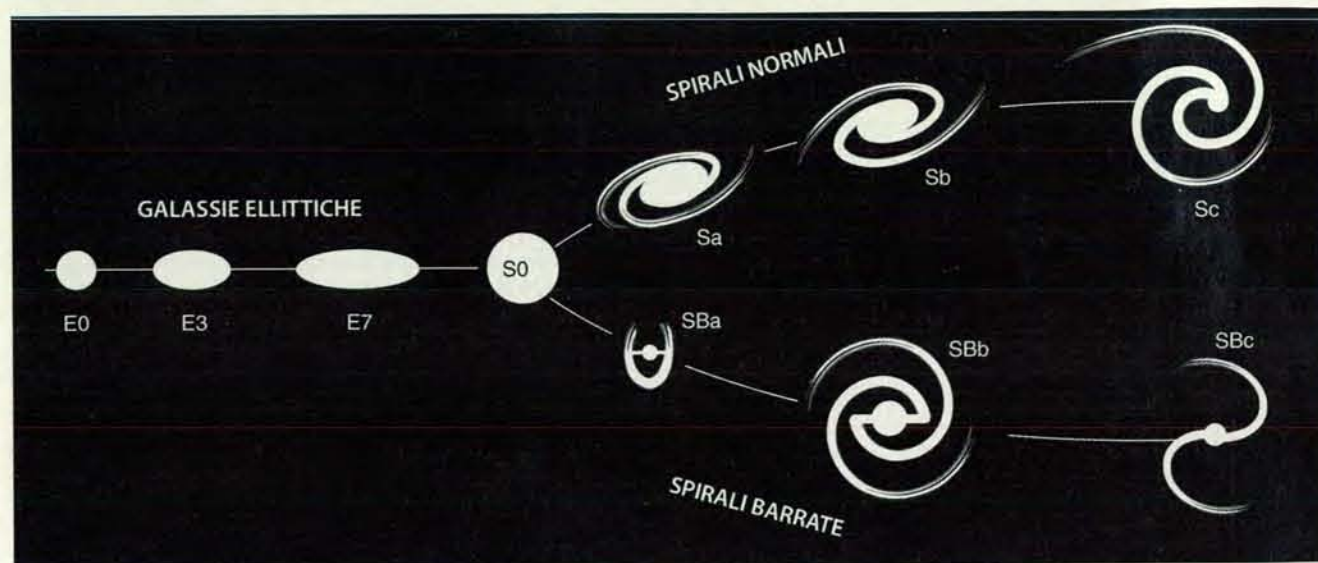
Alla metà del XVIII secolo, Immanuel Kant propose che le nebulose potessero essere sistemi stellari, alla stessa stregua della Via Lattea. La sua ipotesi fu bocciata. All'epoca non era possibile determinare la distanza e le dimensioni di questi oggetti ed era impensabile che l'universo avesse le dimensioni a cui oggi siamo, per così dire, abituati. Da tempo però si sa che l'ipotesi di Kant era inesatta. Le nebulose non sono tutte galassie come la nostra. La «nebulosa» di Andromeda lo è, mentre quella di Orione è una nube di gas appartenente alla nostra stessa galassia.

Per determinare le distanze si dovettero attendere i lavori di Harlow Shapley, che valutò le dimensioni della nostra galassia basandosi sulle stelle denominate Cefeidi. Per queste stelle variabili esiste una relazione definita tra il periodo di oscillazione e la luminosità assoluta. Stabilito il periodo di oscillazione dallo studio della curva di luce, risulta nota la luminosità assoluta, e dal confronto con quella apparente si può ricavare la distanza.

Shapley appurò che la Via Lattea è il piano di un disco sottile, costituito da qualche centinaio di miliardi di stelle e del diametro di alcune centinaia di migliaia di anni luce. La scoperta portò di nuovo all'ordine del giorno la questione della natura delle «nebulose a spirale», menzionate già alla metà del secolo XIX. Al dibattito mise fine Edwin Hubble nel 1923, con la sua scoperta sulle Cefeidi della nebulosa di Andromeda. Hubble spiegò che le «nebulose a spirale» erano galassie di dimensioni paragonabili a quelle della Via Lattea, per quanto situate a distanze di milioni o decine di milioni di anni luce.

Le galassie si compongono di stelle di massa ed età diverse, di polvere e gas (idrogeno soprattutto). Le proporzioni dei costituenti, così come le proprietà fisiche e chimiche, variano in funzione della morfologia della galassia. Esistono galassie ellittiche, lenticolari, a spirale e irregolari. Le galassie ellittiche, sistemi poveri di gas, sono costituite essenzialmente da stelle, disposte a formare la figura di un'ellisse. Le galassie irregolari, le più ricche di gas e polvere, non sembrano avere alcuna forma geometrica definita.

Nelle galassie a spirale predominano gas e stelle. Queste galassie sono costituite da un nucleo centrale, paragonabile per le sue proprietà a una galassia ellittica, e da un disco che lo attraversa, nel quale si concentrano gas e polvere. Il principale contingente di stelle fa parte del disco. Spesso una struttura simile a una barra attraversa il nucleo, dando origine a una galassia «a spirale barrata». Il disco galattico, il cui diametro è molte decine di volte superiore allo spessore, contiene i cosiddetti «bracci», strutture a spirale che parto-

La galassia a spirale NGC 628 (*qui sopra*), in una immagine composta da varie esposizioni combinate ottenute con il telescopio IAC-80 all'Osservatorio del Teide, dell'Istituto di astrofisica delle Canarie, e con il telescopio da 2,2 metri dell'MPIA al Centro astronomico ispano-tedesco di Calar Alto (Almería). In questa galassia il processo di formazione stellare nei bracci di spirale non sembra più efficiente che nel resto del disco, a meno che la funzione di distribuzione delle masse non favorisca la formazione di una percentuale elevata di stelle massicce. Nella pagina a fronte, la galassia a spirale NGC 5194, denominata anche M 51 (oggetto numero 51 del catalogo di Messier degli oggetti diffusi). Questa immagine è una composizione di altre tre di colori distinti per dare un'impressione cromatica più verosimile. Le tre immagini sono state ottenute anch'esse presso il Centro astronomico ispano-tedesco di Calar Alto.

Questo diagramma mostra la classificazione morfologica delle galassie proposta da Hubble nel 1936. Le galassie ellittiche vengono indicate con la lettera *E* seguita da un numero che rappresenta il grado di schiacciamento; seguono le galassie lenticolari S0, a forma di disco ma prive di bracci di spirale. La classificazione continua con le galassie a spirale barrate *SB* e quelle non barrate *S*; la lettera aggiunta indica la dimensione del nucleo e il grado di apertura dei bracci di spirale (*a*: nucleo grande, bracci più raccolti; *c*: nucleo piccolo e bracci molto allargati).

no dal nucleo o dalle estremità della barra. I bracci si dispiegano fino a raggiungere il margine del disco.

Infine, le galassie lenticolari si pongono a metà strada tra quelle ellittiche e quelle a spirale. Presentano un nucleo e un disco, anche se questo è povero di gas. Le galassie lenticolari hanno massa inferiore rispetto a quelle a spirale e non possiedono bracci.

Caratteristica delle galassie dotate di disco (a spirale e lenticolari) è che il materiale costitutivo del disco stesso non ruota come un solido rigido, ma si muove in modo differenziale. Le parti interne, vicine al nucleo, ruotano più rapidamente rispetto alle parti esterne, come scoprì Vesto Slipher nel 1917.

Le galassie contengono quantità diverse di gas in condizioni fisico-chimiche differenti. Non deve stupire, pertanto, che alcuni meccanismi di formazione stellare siano più frequenti in un tipo di galassia che in un altro.

Come nascono le stelle

Ma prima di considerare i meccanismi, conviene prendere confidenza con il processo generale di formazione stellare. Di alcune fasi non siamo in grado di dare una descrizione quantitativa esatta, ma ciò non ci impedisce di fornirne una descrizione qualitativa.

Si sa che il gas a partire dal quale si formano le stelle è, in buona parte, idrogeno molecolare. Esso appare distribuito in nubi dotate di struttura gerarchizzata. Le singole nubi, di pochi anni luce di diametro e di massa inferiore a quella del Sole, si raggruppano in superstrutture di 3000 anni luce e centinaia di milioni di masse solari.

Il gas si trova a una temperatura di una decina di gradi al di sopra dello zero assoluto e ha una densità compresa tra 100 e 1000 molecole per centimetro cubo. Nella parte centrale delle nubi, temperatura e densità sono circa 1000 volte più alte rispetto a questi valori.

Alla stabilità delle nubi molecolari si oppongono diversi fattori, che possono frammentarle in parti di massa molto diversa, alcune delle quali possono formare stelle per collasso gravitazionale. La formazione di stelle spazza via il gas rimanente, impedendo la formazione di altre stelle nella zona. Può accadere però che le stelle neoformate interagiscano con i frammenti residui di nube gassosa, catalizzando la formazione di stelle all'interno di questi ultimi.

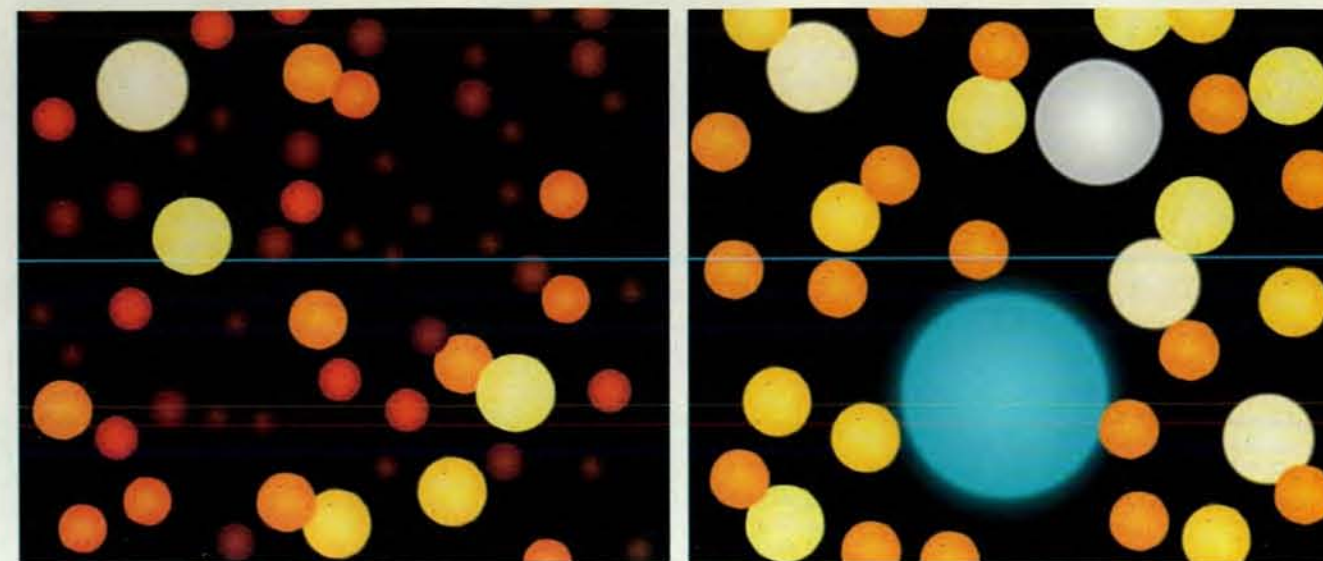
Bisogna, quindi, definire i parametri che controllano la formazione stellare in una determinata regione. Essi sono: il rapporto di formazione stellare, l'efficienza della formazione stellare e la funzione iniziale di massa.

Il rapporto di formazione stellare esprime la massa stellare generata per unità di tempo. L'efficienza rappresenta la frazione (in termini di massa) della nube molecolare che è collassata dando luogo alle stelle. Per funzione iniziale di massa si intende la funzione di distribuzione delle stelle per classi di massa o di tipo spettrale. Queste tre grandezze, indipendenti tra di loro, permettono di quantificare la formazione stellare in una certa zona.

Consideriamo due nubi molecolari: una di 10 000 masse solari, e una di un milione. Se tutto il gas della prima nube collassa e si producono stelle, mentre nella seconda si comporta in questo modo solo la centesima parte del gas, il rapporto di formazione stellare sarà lo stesso nelle due regioni, ma l'efficienza sarà nel primo caso del 100 per cento e nel secondo solo dell'1 per cento.

La funzione iniziale di massa potrebbe non essere la stessa nelle due regioni, per quanto esse generino un'uguale massa di stelle. Una regione può produrre una quantità elevata di stelle di grande massa e pochissime stelle di piccola massa; l'altra, viceversa, potrebbe produrre numerose stelle di massa minore e nessuna di grande massa. Normalmente le stelle piccole sono di gran lunga più numerose di quelle massicce. Dato che le stelle di massa maggiore emettono più luce nella regione visibile dello spettro elettromagnetico, si dice che le stelle di piccola massa indicano la massa di una regione, mentre quelle di grande massa danno conto della luce visibile emessa da tale zona.

Una galassia a spirale può presentare un solo braccio, ma può averne anche diversi e più corti, passando per la conformazione a due bracci simmetrici. I bracci non hanno tutti la stessa luminosità né raggiungono la stessa lunghezza. Nelle galassie a spirale barrata, il numero di bracci è normalmente pari.

Nei bracci di spirale si concentra in

Quando una nube di gas collassa e forma stelle, le masse di queste si distribuiscono a seconda delle condizioni. La funzione di distribuzione è chiamata funzione iniziale di massa. A sinistra è rappresentata la distribuzione nel caso di una funzione iniziale di massa tipica di una nube di gas da 50 masse solari; a destra è mostrata una funzione iniziale di massa tale da inibire la formazione di stelle di piccola massa e favorire la produzione di stelle massicce. Poiché in entrambi i casi si creano 50 masse solari, il rapporto di formazione stellare è il medesimo, ma risulta diversa la distribuzione spettrale di luminosità del gruppo di stelle.

buona parte, se non del tutto, il processo di formazione stellare nel disco. È per questo che lo splendore dei bracci risalta sulla luminosità totale del disco, producendo nelle immagini ottiche la ben nota figura spiraliforme.

Tutte le galassie a disco che contengono gas sviluppano bracci di spirale. Non è così per le galassie lenticolari. Per quanto dotate di disco, esse mancano di una quantità significativa di gas, e quindi non presentano struttura a spirale. Da ciò si deduce che la formazione della spirale è sempre un fenomeno spontaneo, e stabile. Se non lo fosse, solo una parte delle galassie a disco contenenti gas mostrerebbe bracci di spirale. In definitiva, si tratta di un fenomeno che supponiamo vincolato a quello della formazione stellare.

La struttura a spirale risvegliò la curiosità degli astronomi anche prima che si riconoscesse la natura extragalattica delle nebulose a spirale. La storia ha visto succedersi varie teorie che tentavano di dar ragione di questa forma peculiare. Qualunque modello esplicativo proposto deve giustificare le quattro proprietà che caratterizzano la struttura a spirale: deve essere un fenomeno stabile, spontaneo, correlabile con la formazione stellare e tale da permanere anche in presenza di rotazione differenziale. Le prime teorie sulla formazione dei bracci di spirale li consideravano come strutture legate al disco, forse eiezioni di materia del nucleo. Ma questa impostazione sfociava nel dilemma dell'avvolgimento. Se i bracci fossero legati al disco, dato che questo adotta un regime di rotazione differenziale (le parti più interne hanno rotazione più rapida), i bracci si avvolgerebbero su se stessi in un tempo assai breve se confrontato con gli standard astronomici. Considerando una curva di rotazione tipica, in un tempo dell'ordine del 10 per cento dell'età dell'universo, le parti interne del disco dovrebbero aver compiuto 15 rotazioni in più rispetto a quelle esterne.

Per aggirare il problema, gli astronomi considerarono due soluzioni: quella che consiste nel disaccoppiare i bracci di spirale dalla cinematica del disco e quella che sfrutta proprio la rotazione differenziale per spiegare la formazione dei bracci di spirale. La prima costituisce la teoria delle onde di densità; la seconda è la teoria dell'autopropagazione aleatoria della formazione stellare. Entrambe permettono di generare strutture permanenti e in relazione con la creazione di stelle, oltre a soddisfare i requisiti necessari per spiegare la struttura a spirale.

Onde di densità

La teoria delle onde di densità fu proposta nel 1941 da Bertil Lindblad, che dedicò oltre 20 anni al suo sviluppo, sulla base della teoria delle orbite. Il suo modello però non attrasse molta attenzione fino alla seconda metà degli anni sessanta, quando Chia Chiao Lin, Frank Shu e Chi Yuan abbordarono il problema servendosi del formalismo matematico applicato ai raggruppamenti di particelle. Impiegarono le equazioni della dinamica stellare, ricavate da Chandrasekhar, per studiare il comportamento di un disco infinitamente sottile composto da stelle. Fecero ricorso alle equazioni di continuità e di Navier-Stokes della fluidodinamica per descrivere il comportamento di un disco gassoso dallo spessore trascurabile. Finalmente, l'equazione di Poisson permise loro di mettere in relazione il potenziale gravitazionale con la distribuzione totale della massa, vale a dire delle stelle e del gas.

Per risolvere il complesso sistema di equazioni risultante, introdussero piccole perturbazioni del potenziale e, pertanto, della densità e del campo di velocità. Come soluzione del sistema ottennero onde a spirale di maggiore densità che si propagavano attraverso il disco con una velocità angolare costante.

Imponendo che la distribuzione totale di massa delle stelle e del gas obbedisse all'equazione di Poisson, ottennero soluzioni quasi-stazionarie, a condizione che il dominio di esistenza delle onde fosse limitato da due condizioni di risonanza, chiamate risonanza esterna e interna di Lindblad. Le onde di densità non si potevano propagare a raggi inferiori a quelli imposti dalla risonanza interna e superiori a quelli imposti dalla risonanza esterna. In pratica, questi limiti si approssimano abbastanza alla dimensione tipica dei dischi galattici, e i bracci di spirale li occupano in quasi tutta la loro estensione.

Potremmo assimilare le onde di densità a onde di compressione, come le onde sonore che si propagano nell'aria. Sappiamo che la materia del disco si muove in rotazione differenziale, con maggiore velocità angolare nella parte interna e minore in quella esterna. Viceversa, l'onda di densità si muove a velocità angolare costante, nello stesso senso della materia del disco. Nella zona centrale del disco si avrà un «raggio di corrotazione» in corrispondenza del quale la materia del disco si muove alla stessa velocità dell'onda.

Nella zona situata tra la risonanza interna di Lindblad e il raggio di corrotazione, la materia del disco raggiunge l'onda, altera la propria velocità, si comprime e abbandona l'onda riacquisendo la velocità e la densità originarie. Al di là del raggio di corrotazione avviene lo stesso processo, ma in questo caso è l'onda di densità a spirale a raggiungere la materia del disco in rotazione. Per quanto l'onda di densità si muova nello stesso senso dei bracci, possono verificarsi due risultati a seconda dell'orientazione della spirale: che il braccio della galassia punti nel senso del movimento o che punti in senso contrario. Le galassie del primo caso presentano bracci «in anticipo», quelle del secondo caso «in ritardo». Le due possibilità sono equiprobabili dal punto di vista della teoria.

Nel 1966 M. Fujimoto notò che, nel tracciato del braccio a spirale, tranne che nei pressi del raggio di corrotazione, la materia del disco incontra l'onda di densità (o quest'ultima incontra la materia del disco) a una velocità superiore a quella del suono nel mezzo interstellare. La collisione con le nubi di gas incrementerebbe la produzione di stelle e la conseguente luminosità.

Tre anni più tardi, Alar Toomre dimostrò che un'onda con bracci in anticipo non è stabile ma si propaga radialmente fino al centro. Il problema dell'avvolgimento restava aperto. Vi sarebbero, inoltre, altre onde che si propagano fino al raggio di corrotazione o a partire da questo verso l'esterno, in dipendenza dalla sua lunghezza d'onda e dal fatto che i bracci siano in anticipo o in ritardo; esse subirebbero inoltre grandi alterazioni al raggiungimento delle condizioni di risonanza.

Nate dalle supernove

In linea con i risultati di Toomre, i lavori posteriori di Lin, Y. Lau, James Mark e altri mostrarono che le risonanze e la corrotazione non hanno solo un ruolo passivo. Le onde che si propagano radialmente fino al centro si riflettono in un'onda di risonanza interna e aumentano in lunghezza d'onda.

L'onda riflessa, che si propaga radialmente verso l'esterno, in parte si trasmette e in parte si riflette quando raggiunge il raggio di corrotazione. Sia l'onda trasmessa, sia quella riflessa, hanno una lunghezza d'onda ridotta. L'onda trasmessa viene assorbita quando raggiunge la risonanza esterna, mentre quella riflessa si propaga verso il centro, amplificata dalla conservazione del momento angolare. Si genera una sovrapposizione di modi a spirale nel disco, che origina un modello d'onda quasi-stazionario. Questa formulazione migliorata della teoria delle onde di densità è detta teoria modale.

La nuova espressione permette di spiegare perché le galassie abbiano, per la maggior parte, bracci in ritardo, come hanno mostrato gli studi di I. Pasha e collaboratori a partire dal 1979. E spiega l'esistenza delle galassie a spirale barrata con la sovrapposizione, nella regione centrale, di un'onda in ritardo e un'altra in anticipo. Per quanto concerne la loro origine, le onde di densità potrebbero risultare da interazioni con altre galassie, da distorsioni del nucleo o dalla dinamica intrinseca del disco.

Sebbene le onde di densità siano state osservate nel 1976 dal gruppo di François Schweizer e, indipendentemente, da quello di S. Strom, la loro ubiquità non fu confermata se non otto anni più tardi. Nel 1984 Debra e Bruce Elmegreen dimostrarono la presenza di onde di densità nei dischi e conclusero che le galassie con bracci di spirale più luminosi e definiti possedessero onde di ampiezza maggiore.

La teoria dell'autopropagazione aleatoria della formazione stellare si raffinò grazie alla comparsa della teoria delle onde di densità. Ma le prime idee sulla possibile propagazione della formazione stellare da una regione alle altre risalgono a E. Opik che, nel 1953, propose che la compressione del gas necessaria a generare stelle potesse essere dovuta a esplosioni di supernova in regioni di formazione stellare vicine alla nube di gas.

Nel 1963, Walter Baade suggerì che la formazione stellare in IC1613 - galassia irregolare del Gruppo locale distante circa due milioni e mezzo di anni luce - si fosse prodotta mediante propagazione da una regione all'altra. Nel 1964, Adriaan Blaauw sostenne l'esistenza di sequenze di età da un estremo all'altro di taluni aggregati di stelle della nostra galassia. Nel 1966, Bengt Westerlund e Donald Mathewson trovarono indizi che confortavano l'ipotesi di Opik. Scoprirono stelle giovani ai margini delle «bolle» di idrogeno create da esplosioni di supernova.

Il terreno era pronto perché, nel 1976, Mark Mueller e David Arnett incorporassero l'autopropagazione in una simulazione al calcolatore e ottenessero strutture a spirale. Poco realistiche, esse sparivano entro un piccolo numero di rotazioni galattiche. Mueller e Arnett partirono dal presupposto di una propagazione deterministica, in virtù della quale un'esplosione di supernova scatenerebbe il processo di formazione stellare nelle regioni vicine.

Nel 1978, Humberto Gerola e Philip Seiden introdussero nel processo una componente aleatoria. Secondo loro, la formazione stellare si autopropaga solo ad alcune regioni e non ad altre, in base al valore assegnato a una variabile probabilistica. In seno a questa teoria il processo di formazione dei bracci viene integrato in modelli computerizzati assegnando valori arbitrari a certe variabili.

Nella simulazione di Gerola e Seiden si suppone che il disco galattico, infinitamente sottile, sia suddiviso in celle, di circa 650 anni luce, che si muovono in regime di rotazione differenziale; quelle interne ruotano più rapidamente rispetto alle esterne, secondo una curva di rotazione verosimile. In accordo con questo modello, c'è una probabilità, piccola ma non nulla, che si sviluppi spontaneamente un processo di formazione stellare in alcune di queste celle, il quale andrebbe estendendosi alle celle vicine, in maniera aleatoria.

Si introduce allora la rotazione differenziale. Le celle alle quali si è propagata la formazione stellare sono circondate da nuove celle, alle quali può propagarsi in maniera aleatoria la formazione stellare. Si introduce di nuovo la rotazione differenziale e si reitera il processo. Per riprodurre nel modo migliore le condizioni fisiche del mezzo interstellare, si aggiunge un tempo di recupero, vale a dire il tempo impiegato da una cella che ha già formato stelle a tornare nelle condizioni necessarie per produrne altre.

Oltre a riscaldare il mezzo interstellare, il fenomeno della formazione di stelle distrugge le parti della nube molecolare prossime alle stelle più calde. L'aleatorietà del processo non dipende da alcun fattore intrinseco. Non è obbligatorio che una determinata nube molecolare si trovi in uno stato propizio per formare stelle, purché lo sia un'altra adiacente. Di questa ambiguità si deve in qualche modo tener conto nel modello. E in questo modo introduciamo informazione su fenomeni fisici locali, impossibile da ottenere in processi di macroscala. Ben presto apparvero le pecche del modello che abbiamo appena esposto. Le variabili in ingresso (dimensione delle celle, probabilità spontanea, probabilità indotta, tempo di recupero e altre) mancavano di un'interpretazione fisica. L'intervallo di valori che si possono adottare non ha altra giustificazione che l'idoneità a originare spirali plausibili. Valori diversi non creano alcuna struttura a spirale e, se la generano, è transitoria.

Il diagramma di Hertzsprung-Russell rappresenta la relazione tra la luminosità delle stelle e la loro temperatura superficiale. Le stelle si raggruppano in talune regioni del diagramma. Le stelle della «sequenza principale», come il Sole, formano una diagonale dall'estremo superiore sinistro, dove si trovano le stelle di maggiore dimensione, massa e temperatura, fino all'inferiore destro, dove si situano quelle più piccole, meno massicce e più fredde. Le «supergiganti» nella parte alta e le «giganti» in quella centrale, a destra della sequenza principale, sono molto più voluminose delle stelle della sequenza principale; per esigenze di rappresentazione sono state rese a un cinquantesimo della proporzione reale. I colori e le dimensioni relative sono un'approssimazione della realtà.

Nel 1983, Thomas Statler, Neil Comins e Bruce Smith tentarono di sviluppare un modello tridimensionale che tenesse conto anche dello spessore del disco, ma non ebbero successo. Le spirali generate erano transitorie e poco definite. Il loro lavoro ebbe pochissima eco. Nessuno avrebbe messo in discussione il meccanismo di autopropagazione aleatoria per spiegare la struttura a spirale.

Stando così le cose, mi proposi nel 1998 con José Miguel González di stabilire la validità dei modelli tridimensionali di autopropagazione. A questo fine abbiamo sviluppato un modello di autopropagazione in un disco tridimensionale in rotazione differenziale. Il nostro modello, che genera bracci di aspetto e stabilità simili a quelli del modello bidimensionale di Gerola e Seiden, dimostra che il processo aleatorio tridimensionale è plausibile.

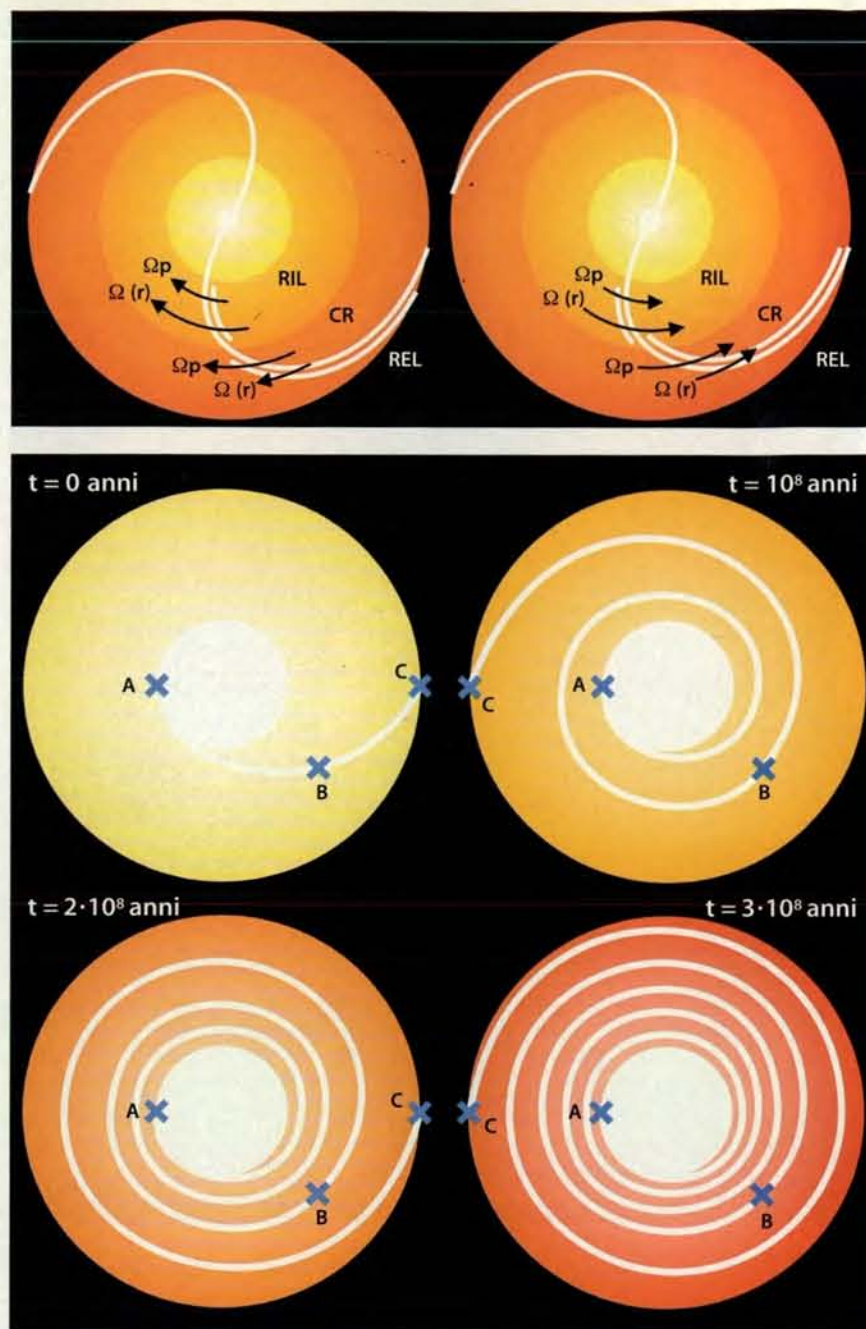
I bracci di spirale che risultano dal modello di autopropagazione sono brevi, numerosi e poco definiti, come avviene in alcune galassie reali. Per questo, gli Elmegreen introdussero, nel 1982, una classificazione delle galassie a spirale in base al grado di definizione dei bracci. Nel 1984 avevano trovato che le galassie con bracci meglio definiti presentavano onde di densità di ampiezza maggiore. Proposero che nelle galassie dai bracci continui e più evidenti il processo di formazione stellare fosse associato a onde di densità, mentre nelle altre prevalesse il meccanismo di autopropagazione.

Le cose, però, non erano così semplici. Nel 1986 Stephen Lubow, Steven Balbus e Lennox Cowie scoprirono che la viscosità del gas e l'interazione gravitazionale tra il disco di gas e il disco di stelle, indipendenti nel modello di Lin e Shu, di fatto impedivano le collisioni. Veniva smentita, inoltre, l'ipotesi di Fujimoto, e la teoria delle onde di densità si ritrovava senza meccanismo di formazione stellare.

Nel lavoro del 1984, gli Elmegreen proponevano che il rapporto di formazione stellare non dipendesse dall'ampiezza dell'onda di densità. Due anni dopo, dimostrarono che le onde di densità non intensificavano la formazione stellare. Nel 1986 fu pubblicato un altro lavoro in questo senso, firmato da Marshall McCall e Fred Schmidt.

Nelle ricerche degli uni e degli altri, si misurava il rapporto di formazione stellare mediato su tutto il disco, per metterlo successivamente in correlazione con il grado di definizione dei bracci a spirale. Una simile correlazione non era però riscontrabile. E, in assenza di essa, non si poteva attribuire ai bracci di spirale la formazione stellare.

D'altra parte, per dimostrare che le onde di densità non influiscono sulla formazione stellare non basta appellarsi al tasso di produzione di stelle per unità di superficie. Occorre studiare caso per caso e confrontare la formazione stellare nei bracci con la generazione nel resto del disco.

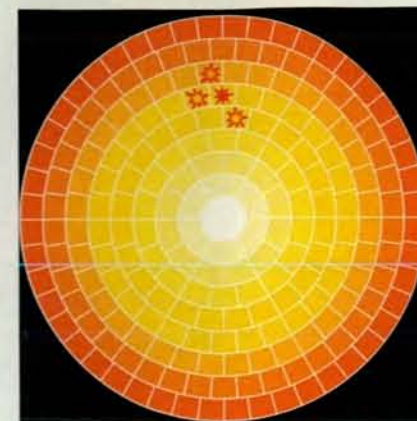
Le parti esterne del disco di una galassia a spirale hanno una rotazione angolare più lenta rispetto a quelle interne, fenomeno detto rotazione differenziale. Per questo, se i bracci di spirale fossero una struttura legata al disco, si avvolgerebbero su se stessi producendo una configurazione che non si osserva nella realtà, e finirebbero per scomparire. Nell'illustrazione in basso è mostrato un segmento di braccio che parte da un punto A situato al margine del nucleo e termina in un punto C al bordo del disco. Il punto B si trova a metà strada tra A e C. Per un disco di dimensioni medie e una curva di rotazione tipica, dopo 100 milioni di anni il punto A avrà percorso un giro, mentre C ne avrà percorso solo mezzo (*in alto a destra*). Dopo 200 milioni di anni, il punto A avrà fatto due giri e C uno (*in basso a sinistra*). Dopo 300 milioni di anni A avrà percorso tre giri e C solo uno e mezzo (*in basso a destra*), e così via. In un tempo pari all'età dell'universo, il punto A avrà fatto 50 giri più del punto C. In alto, si vede come le onde di densità si producano solo fra la risonanza interna (RIL) e la risonanza esterna di Lindblad (REL). Possiamo paragonare il moto dell'onda di densità a quello di un solido rigido con velocità angolare costante Ω_p. La materia del disco si muove, in regime di rotazione differenziale, a una velocità $\Omega(r)$. Esiste un raggio, detto di corrotazione (CR), dove la materia del disco e l'onda di densità hanno la stessa velocità di rotazione. Data la rotazione differenziale, tra RIL e CR l'onda di densità si muove più lentamente del disco, mentre tra CR e REL avviene l'opposto. Se gli estremi dei bracci puntano nello stesso senso in cui si muove il disco (*a destra*), vengono denominati «bracci in anticipo»; se puntano in senso contrario «bracci in ritardo» (*a sinistra*). La maggioranza delle galassie è riconducibile a quest'ultimo caso.

Alla fine degli anni ottanta si fece strada con più forza l'idea che il processo di formazione stellare fosse dovuto solo all'autopropagazione. Nelle galassie dai bracci meglio definiti l'onda di densità, la cui esistenza era data per certa, controllava il processo di autopropagazione, privilegiando le zone di maggiore densità del gas.

Tuttavia il processo di autopropagazione non giustificava né l'esistenza dei gradienti di età e di colore, né l'efficienza della formazione stellare. Yuri Efremov nel 1985 e T. Sitnik nel 1989 rilevarono gradienti di età nella nostra galassia all'interno di un braccio di spirale. Anche il gruppo di Paul Hodge rilevò, nel 1990, gradienti di colore in galassie esterne alla Via Lattea.

Il ruolo dei bracci

Nel 1995, Soledad del Rio e il sottoscritto misurarono gradienti di colore nei bracci di un campione di galassie a spirale. Nel mettere in relazione tali gradienti con la posizione di risonanze e corrotazioni, riuscimmo a evidenziare differenze significative tra le galassie dai bracci ben definiti e quelle dai bracci meno definiti.

Dal 1989 il mio gruppo dell'Universidad de La Laguna sta sperimentando svariati metodi per valutare l'efficienza della formazione stellare dei bracci in confronto a quella del resto del disco. In uno di quei primi lavori, studiai, con John Beckman, diverse galassie dai bracci ben definiti e altre dai bracci con un tracciato più indistinto; osservammo che nelle prime l'efficienza di formazione delle stelle di grande massa era maggiore nei bracci che nel resto del disco, mentre nelle seconde era dello stesso ordine di grandezza. Risultati che furono confermati da Linda Tacconi e Judith Young nel 1990, da Christine Wilson e Nicholas Scoville nel 1991 e dal gruppo di Johan Knapen in lavori effettuati a partire dal 1992.

Non vi era accordo tra le due ipotesi

Nel modello dell'autopropagazione casuale il disco di una galassia si considera composto da celle di uguale dimensione in rotazione differenziale. La formazione stellare che, spontanea o indotta, si produce in una cella (*stella piena*) può trasmettersi in modo casuale a celle vicine (*stelle vuote*). Queste inducono, a loro volta, la formazione stellare in altre celle attigue.

La galassia a spirale NGC 5248 appare in una immagine a colori combinata realizzata al telescopio Isaac Newton (da 2,5 metri) del gruppo Isaac Newton, installato nell'Observatorio del Roque de Los Muchachos (La Palma) dell'Istituto di astrofisica delle Canarie. In questa galassia singolare la funzione iniziale di massa nei bracci genera una frazione elevata di stelle massicce. I bracci hanno anche un'efficienza maggiore rispetto al resto del disco in quanto a produzione di stelle.

sul meccanismo dominante nella formazione stellare a grande scala. Entrambe davano per scontato che la funzione iniziale di massa fosse la stessa nei bracci rispetto al resto del disco.

D'altra parte, se la funzione iniziale di massa nei bracci favorisse la formazione di una frazione elevata di stelle di grande massa, più luminose, rispetto al resto del disco, misureremmo una maggiore efficienza di formazione di stelle massicce nei bracci. Questa maggiore efficienza non implicherebbe però una maggiore efficienza globale, vale a dire relativa alla massa totale delle stelle.

Però, se misurare l'efficienza di formazione stellare non è semplice, è ancora più complesso stimare la funzione iniziale di massa, compresa quella della nostra galassia. Dal 1995, sto sviluppando con Fernando de Pablos un metodo alternativo per stimare efficienze di formazione stellare per tutto l'intervallo di masse; metodo con cui confrontiamo queste grandezze nei bracci rispetto al resto del disco. Così facendo, però, poniamo limiti ai valori che possono assumere le funzioni iniziali di massa dei bracci e del resto del disco.

In base ai risultati che abbiamo ottenuto lavorando su un campione di galassie dai bracci ben definiti, le funzioni iniziali di massa differiscono nei bracci e questi riescono in misura minore del disco a generare stelle di tutte le masse, sebbene lo superino in quanto a produzione delle stelle più massicce. Ciò è vero per quel che riguarda la maggior parte delle galassie del nostro campione. In poche altre l'efficienza di formazione di stelle di tutte le masse è maggiore nei bracci che nel resto del disco, senza che vi siano differenze nelle funzioni iniziali di massa.

Nelle galassie dai bracci ben definiti, l'efficienza di formazione di stelle di grande massa è maggiore nei bracci. Inoltre, essendo qui diversa la funzione iniziale di massa, i bracci non generano una massa totale di stelle maggiore rispetto al resto del disco. Questo fenomeno non si verifica in galassie dai bracci meno definiti. Pertanto, se ne dovrà concludere che le onde di densità intervengono nella formazione stellare aumentandone l'efficienza o alterando la funzione iniziale di massa, in modo tale che nei bracci viene prodotta una frazione maggiore di stelle più massicce e luminose rispetto al resto del disco.

Nel 1998, José Miguel González e io includemmo un'onda di densità nel modello di autopropagazione tridimensionale. Oltre a ottenere bracci più definiti, come ci aspettavamo, arrivammo a conclusioni interessanti. In primo luogo, se l'onda di densità è del tipo con bracci in anticipo, la struttura a spirale scompare. In secondo luogo, l'autopropagazione sviluppa i bracci al di là della risonanza esterna di Lindblad, serrandoli fin quasi a produrre un anello in alcuni casi. Questa seconda conseguenza potrebbe spiegare alcune discrepanze nella stima delle posizioni che si assegnano alle risonanze in certe galassie; inoltre si osservano anelli in una frazione apprezzabile di galassie.

A seconda, infine, delle caratteristiche del mezzo interstellare e dell'ampiezza dell'onda di densità, si potrà avere un'intensificazione della formazione stellare o l'alterazione della funzione iniziale di massa. Con tutto questo, il processo di formazione stellare nelle galassie non può dirsi in assoluto sviscerato. Ma si può dire di aver compiuto un altro passo avanti nella comprensione delle leggi che lo regolano.

JORDI CEPA NOGUÉ, esperto in formazione stellare, insegna astrofisica presso la Universidad de La Laguna, oltre a svolgere lavoro di ricerca presso l'Istituto di astrofisica delle Canarie.

ELMEGREEN B., *Triggered Star Formation* in *Star Formation in Stellar Systems*, Cambridge University Press, 1992.

FRANCO J., *Large Scale Propagating Stellar Formation* in *Star Formation in Stellar Systems*, Cambridge University Press, 1992.

BERTIN G. e LIN C. C., *Spiral Structure in Galaxies*, The MIT Press, 1996.

DigitalVision

Fare film sta cambiando

di Peter Broderick

Videocamere digitali e nuovi strumenti di montaggio non solo trasformano il modo di produrre film, ma determinano anche quali film vengano prodotti

La rivoluzione digitale nella produzione di film è in corso: la già impressionante qualità raggiunta dalle videocamere digitali commerciali continuerà a migliorare, così come la potenza degli strumenti per il montaggio al computer. Il maggiore ostacolo che rimane è il sistema di distribuzione tradizionale, incapace di gestire la nuova ondata di produzione di film digitali. In effetti, finora la rivoluzione digitale ha avuto il maggiore impatto nel settore della produzione indipendente. Lavorando al di fuori delle infrastrutture e delle costrizioni degli studi hollywoodiani, i produttori indipendenti hanno la flessibilità necessaria per cogliere nuove opportunità e sono molto motivati a ridurre i costi di produzione.

Ho partecipato a questo sviluppo con Next Wave Films, una società dell'Independent Film Channel che finanzia cineasti indipendenti, sia che riprendano su pellicola o in digitale. Tra il 1998 e il 1999 il numero di richieste di fondi per opere digitali è raddoppiato, fino ad arrivare al 51 per cento delle richieste totali nei primi sei mesi del 2000.

Non deve sorprendere che i primi utilizzatori delle tecnologie digitali siano stati i cineasti con risorse finanziarie limitate. Il cinema è sempre stato una delle forme d'arte più costose: a differenza di un poeta o di un pittore, un regista ha bisogno di risorse finanziarie e di attrezzature costose. Nessun progresso ha abbassato il costo delle produzioni cinematografiche così drasticamente quanto le videocamere digitali e i software di post-produzione per il montaggio e gli effetti speciali. I cineasti indipendenti possono ora permettersi i mezzi necessari alle fasi sia di produzione sia di post-produzione e produrre opere che non riuscirebbero mai a filmare nel modo tradizionale.

Lo spettro dei budget per fare film digitali è molto ampio. I prossimi episodi della saga di *Guerre Stellari* vengono girati con camere ad alta definizione e probabilmente costeranno oltre 100 milioni di dollari. L'ultimo film digitale di Lars von Trier, *Dancer in the Dark*, è costato circa 13 milioni di dollari, ma altri registi hanno realizzato film digitali con budget compresi tra 2 e 8 milioni di dollari e alcuni esordienti hanno diretto le loro opere prime con meno di 10 000 dollari.

In generale, quanto più basso è il budget tanto maggiore è il vantaggio finanziario di girare in digitale: il costo del materiale e dello sviluppo delle pellicole grava di più sul budget complessivo dei film meno costosi.

Un nuovo modello di finanziamento

Le apparecchiature digitali hanno trasformato l'economia della produzione di film a basso costo. Nel modello tradizionale, lo scrittore crea una sceneggiatura e poi cerca di convincere qualche finanziatore a fornire i fondi necessari a trasformarla in un film. Se ci riesce, probabilmente dovrà accettare compromessi sulla direzione artistica del film; spesso ciò significa cedere alla controparte finanziaria il potere di approvare la sceneggiatura e il cast, sia essa uno studio di Hollywood o una compagnia indipendente.

Nel nuovo modello di produzione di film con videocamere digitali, i cineasti valutano realisticamente le risorse prima di scrivere la sceneggiatura: in questo modo essa può adeguarsi ai fondi disponibili, e ci si può dedicare alla parte artistica del lavoro anziché a cercare denaro.

Nei primi anni novanta, vi fu una serie di film a budget ultra-basso, tutti girati su pellicola prima dell'avvento del digitale: *El Mariachi*, per il quale Robert Rodriguez aveva a disposizione un

La videocamera digitale

Le videocamere digitali catturano le immagini su chip di silicio, anziché sulle ordinarie pellicole da 16 o 35 millimetri delle cineprese tradizionali. I dati passano dal chip a una videocassetta nella videocamera. Il regista può collegare la videocamera a un computer tramite un cavo IEEE 1394, trasferire i dati sul disco fisso del computer e montare le immagini senza alcuna perdita di qualità. Finora, una volta completati, i film vengono generalmente trasferiti su pellicola per poter essere mostrati al pubblico mediante un tradizionale proiettore da cinema. Ma quando si diffonderanno i proiettori digitali i dati potranno essere inviati via satellite o con cavi a fibre ottiche.

La cinepresa

Le cineprese tradizionali registrano 24 fotogrammi al secondo su una pellicola a base di acetato sulla quale sono deposti tre strati di emulsione di alogenuro d'argento sensibilizzati al rosso, al verde o al blu. Dopo che la pellicola è stata esposta e sviluppata, il negativo è trasferito sul nastro magnetico di una videocassetta. L'informazione così registrata (immagini e suoni) è immessa in un sistema di montaggio non lineare controllato dal computer, di solito un Avid. Il film è montato in modo digitale su questo sistema, che produce un'EDL (edit decision list) che indica con precisione quali parti del negativo originale saranno usate e in che ordine; il negativo sarà tagliato appropriatamente. Infine, dal negativo finale si realizzano le copie per la distribuzione nei cinema.

George Retseck

cane e uno scuolabus, divenuti motivi portanti del film; *Commessi*, realizzato da Kevin Smith nel negozio in cui lavorava realmente e *The Brothers McMullen* girato principalmente nella casa dei genitori di Edward Burns, dove la madre cucinava per la *troupe*. Questi esempi hanno dimostrato per la prima volta che si potevano fare film con meno di 100 000 dollari; e ora l'avvento dei mezzi digitali ha accelerato la riduzione dei budget per le opere prime, concedendo maggiori possibilità creative a tutti coloro che vogliono realizzare un film.

Le nuove possibilità creative in campo digitale

Sul set di un film tradizionale, la cinepresa è in funzione solo per una piccola parte del tempo, a causa del costo del materiale e dello sviluppo e del tempo richiesto per illuminare e preparare ciascuna scena. Sul set di un film in digitale, la videocamera riprende per una frazione molto maggiore del tempo, e i registi spesso usano due camere, cosa improponibile per la maggior parte dei film girati su pellicola.

In alcune produzioni a basso costo, il rapporto tra il metraggio delle scene girate e di quelle utilizzate può essere di 3 a 1; per le opere in digitale il rapporto può arrivare anche a 50 a 1. Ciò consente di lavorare in modo improponibile con i film tradizionali: si possono filmare le prove, cogliendo momenti di ispirazione che altrimenti andrebbero persi. Invece di effettuare poche riprese, il regista può girare quanto è necessario per raggiungere un alto livello qualitativo, ed è possibile sperimentare per tutto il processo di realizzazione del film, grazie al playback digitale, che permette di vedere immediatamente ciò che è stato registrato sul set, invece di aspettare uno o due giorni.

Le videocamere digitali permettono anche di girare una storia immaginaria in un ambiente reale. Michael Rehfield, regista e protagonista di *Big Monday*, ha ambientato il suo film nelle vie e nella metropolitana di New York. A differenza dei film girati in esterno usando scene preparate con cura, *Big Monday* mostrava la vita di una strada vera, comunicando un'autenticità da documentario. Un altro esempio è quello di Paul Wagner, che ha usato una piccola camera digitale per girare in Tibet alcune scene chiave della sua opera *Windhorse*, estremamente critica sull'occupazione cinese di questo paese. Le autorità non avrebbero mai permesso di girare sul luogo un film del genere, ma gli operatori furono scambiati per turisti che realizzavano un video amatoriale.

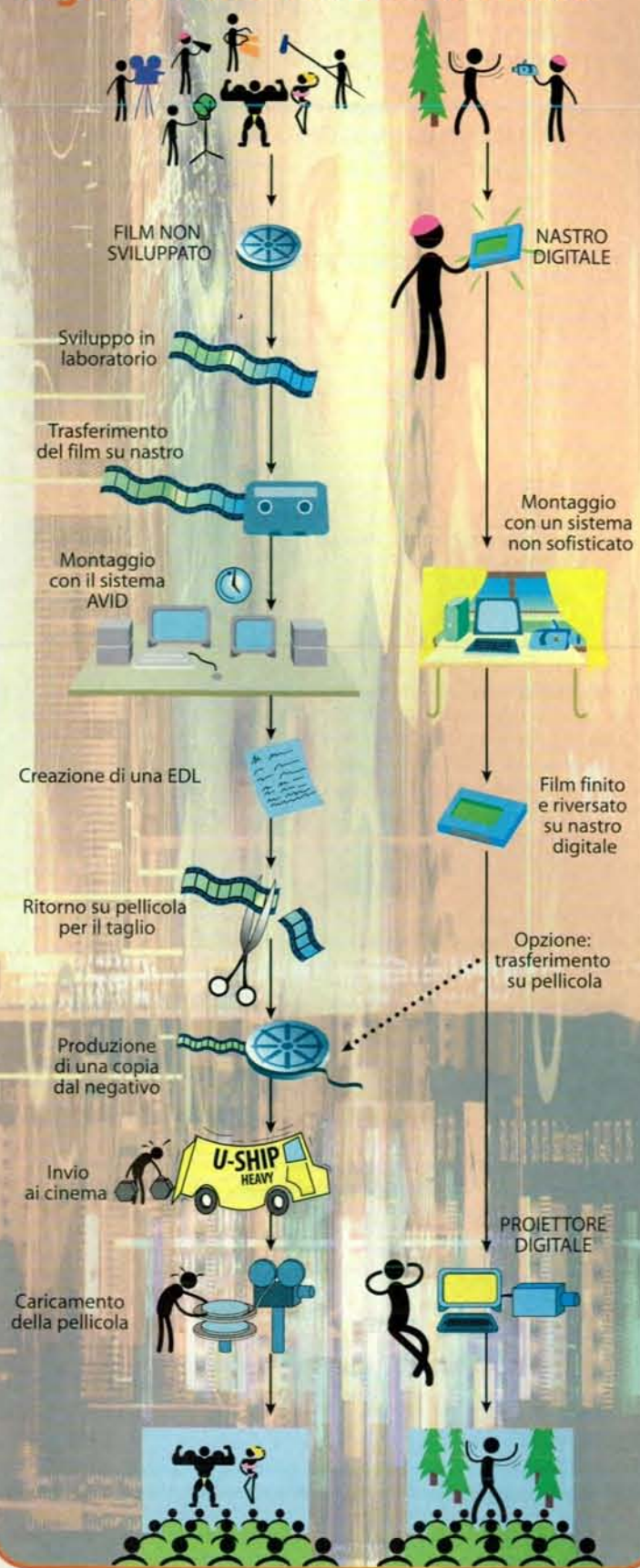
Se il regista ha una videocamera digitale e sta lavorando con un piccolo gruppo di operatori e di attori, può sfruttare fattori imprevedibili, così come succede nel girare documentari. Lo scorso autunno chiesi a un regista quando pensasse di finire il suo film digitale. «Questa sera, se si mette a piovere» fu la risposta.

Inoltre la produzione digitale riduce il costo della creazione di effetti visivi, via via che migliora la possibilità di produrre al computer effetti spettacolari e raffinati. Di recente la Next Wave Films ha ricevuto un film a basso costo con eccellenti effetti digitali che probabilmente sarebbero costati uno o due milioni di dollari se fossero stati realizzati da uno studio di effetti speciali.

I produttori di film digitali possono anche evitare il trasferimento su pellicola per la distribuzione nei cinema, o posticiparlo finché non trovano un finanziatore. Se invece il film non viene proiettato nel circuito dei cinema, la copia originale basta per la trasmissione televisiva via cavo, via etere o via satellite, o anche per la diffusione su Internet.

Entusiasmo degli indipendenti, cautela di Hollywood

Sebbene la produzione digitale di film abbia acquisito importanza nel settore indipendente, il cambiamento a livello dei grandi studi di produzione, che hanno investito in un processo produttivo standardizzato da decenni, è stato molto più lento. Anche grazie all'attività della sua società di

Bryan Christie

effetti speciali, la Industrial Light & Magic, George Lucas è uno dei principali sostenitori dell'evoluzione digitale nella comunità dei produttori cinematografici. Oltre ad aver promosso l'avvento della proiezione digitale insistendo, nella primavera 1999, affinché *La minaccia fantasma* fosse proiettato elettronicamente in diversi cinema, Lucas è stato un catalizzatore nel diffondere la produzione digitale nel settore ad alto budget. Con l'annuncio che il secondo e terzo episodio della nuova trilogia di *Guerre stellari* saranno girati con camere ad alta definizione, egli ha non solo espresso la sua convinzione che film da 100 milioni di dollari possano essere prodotti in digitale, ma ha anche spronato Sony e Panavision a collaborare nello sviluppo di nuove camere digitali ad alta definizione.

Oltre ad avere una risoluzione circa doppia rispetto al video tradizionale, queste camere producono 24 schermate al secondo: l'ideale per materiale destinato a essere trasferito su pellicola a 24 fotogrammi al secondo. Si evitano così molte delle anomalie che possono peggiorare la qualità del trasferimento da video a film.

Ma non è certo venuto il momento di dichiarare morto il film su pellicola. Centinaia di migliaia di cinefili in tutto il mondo si sono formati su celluloide; Hollywood non vuole mettere in pericolo il suo rapporto con il pubblico e, anche se la vendita di videocassette è più remunerativa, la distribuzione cinematografica è una fonte di entrate non secondaria.

Gli studi di produzione più importanti saranno molto cauti nell'introdurre mezzi di produzione digitali, almeno finché non sarà ben chiaro che si può girare in digitale e raggiungere alla fine una qualità equivalente a quella dei film attuali proiettati in un cinema. Alcuni film potranno essere ibridi, con un misto di pellicola e digitale; altri useranno la tecnologia digitale per ottenere effetti particolari che non assomiglino ai film su pellicola.

I mezzi digitali potranno trasformare la distribuzione?

Via via che la produzione di film digitali aumenterà, un numero crescente di film eccellenti non troverà distribuzione adeguata nei cinema poiché gli schermi convenzionali saranno ancora dedicati ai prodotti di Hollywood. Il numero di film indipendenti girati annualmente negli Stati Uniti potrebbe facilmente raddoppiare nei prossimi anni, il che porterà verosimilmente a una crisi nella distribuzione di queste produzioni.

D'altra parte, oggi gli indipendenti hanno un'opportunità senza precedenti per sviluppare vie di accesso al pubblico che siano alternative al sistema di distribuzione tradizionale. Nonostante le difficoltà, i produttori indipendenti hanno molte frecce al loro arco. La conoscenza della loro attività da parte del pubblico è cresciuta, grazie a una maggiore divulgazione offerta dalla stampa e dai festival cinematografici e alla diffusione di canali via cavo dedicati al cinema; si può perciò prevedere che l'offerta di eccellenti film digitali continuerà a crescere.

Next Wave Films

Sempre più registi girano documentari e film con videocamere digitali, come quelle usate per *Paper Chasers* (*sopra*). Le videocamere digitali aumentano la possibilità di far entrare nel film situazioni non previste.

E poi c'è Internet: la rete sarà la chiave nello sviluppo di nuovi modelli di distribuzione e permetterà agli indipendenti di costruirsi accessi diretti al pubblico. Chiunque acceda a Internet può acquistare on-line un film e farselo recapitare per posta in forma di videocassetta o di DVD. Gli indipendenti, da Kevin Smith (*Commessi*, *In cerca di Amy*) al gruppo di *The Blair Witch Project*, hanno già dimostrato la capacità di Internet di attrarre l'interesse del pubblico su film proiettati nelle sale cinematografiche. Una tecnica analoga può essere adattata al mercato dei film digitali non distribuiti nei cinema, per renderli accessibili a spettatori di tutto il mondo.

Infine, una volta che la larghezza di banda sarà incrementata in modo sostanziale, i film potranno essere forniti on-line. Gli spettatori con accesso al World Wide Web ad alta velocità e connessioni fra computer e televisore potranno vedere i film a casa con una qualità audio e video ragionevolmente buona.

Gli indipendenti tenteranno di reinventare la distribuzione usando il Web in tandem con altre strade digitali. I sistemi di proiezione digitali permetteranno per esempio lo sviluppo di una rete di «microcinema», che potranno operare con una copertura finanziaria molto più bassa dei cinema tradizionali e rivolgersi a un pubblico affezionato che cerca i migliori nuovi film prodotti fuori da Hollywood. Un'altra via da perseguire sarà quella delle trasmissioni via satellite e via cavo.

Il rovescio della medaglia è che, se gli indipendenti non riusciranno a creare nuovi meccanismi di distribuzione, potranno essere emarginati. Anche se per loro fare film sarà più facile che nell'era «analogica», sarà più difficile ottenerne la proiezione nelle sale. Ma se riusciranno a tracciare nuove strade per la distribuzione, l'originalità e la qualità dei film disponibili al pubblico aumenteranno drasticamente: la rivoluzione digitale nella produzione potrebbe condurre a un rinascimento digitale nella distribuzione.

PETER BRODERICK è presidente della Next Wave Films, che finanzia film digitali e fornisce fondi a cineasti indipendenti. Ha tenuto corsi sulla produzione indipendente di film all'Università della California a Los Angeles e presentazioni sulla produzione digitale a vari festival cinematografici. Mark Stolaroff e Tara Veneruso hanno collaborato strettamente con Broderick a questo articolo.

COLLIER MAXIE, *The IFILM DV Filmmaker's Handbook*, Son #1 Media, 1998; disponibile al sito www.dvfilmmaker.com
BILLUPS SCOTT, *Digital Moviemaking*, Michael Wiese Productions, 2000; disponibile al sito www.mwp.com/pages/booksdigitalmovie.html
«DV»; sul Web all'indirizzo www.dv.com
«RES»; sul Web all'indirizzo www.resmag.com
«Videography»; sul Web all'indirizzo www.videography.com
www.2-pop.com www.nextwavefilms.com

I primi passi del cinema digitale

di Peter D. Lubell

I proiettori digitali della Texas Instruments mandano la luce a prismi che inviano le lunghezze d'onda del rosso, del verde e del blu agli appropriati dispositivi digitali a microprismi (DMD). Intanto l'informazione convertita in pixel dal file del film viene inviata inquadratura per inquadratura al DMD. Un DMD sta nel palmo di una mano e i suoi minuscoli specchi, ciascuno di 16 micrometri quadrati, ruotano indipendentemente su perni micromeccanici, secondo le istruzioni digitali. Le componenti riflesse tornano a mescolarsi prima di raggiungere la lente del proiettore.

Fin dal primo episodio di *Guerre stellari*, 23 anni fa, George Lucas è stato un pioniere della tecnologia applicata al cinema. Il suo film più recente, *La minaccia fantasma*, contiene circa 2000 effetti speciali girati in digitale. Ma Lucas si è spinto ancora più in là: negli Stati Uniti alcune delle prime proiezioni, nell'estate del 1999, sono state realizzate in digitale, meravigliando il pubblico per la qualità straordinaria del suono e per la brillantezza e la definizione delle immagini.

Il proiettore digitale funziona, ma si devono ridurre i costi perché possa trovare ampia diffusione. Per i film tradizionali, occorre produrre molte copie in negativo dall'originale in positivo del film montato; dai negativi si ottengono le migliaia di copie positive da distribuire nei cinema. Il cinema digitale parte anch'esso da una copia originale: l'intero film, dopo il montaggio, è un grosso file, in media di circa 1000 gigabyte. Una volta compresso, il file potrebbe essere trasferito ai cinema mediante cavi a fibra ottica o via satellite. Nelle dimostrazioni del 1999 i dischi fissi con i relativi drive furono trasportati fisicamente nei luoghi di proiezione. Dimostrazioni successive a più bassa risoluzione della Disney Films usavano DVD come supporto trasportabile.

I test del 1999 sperimentavano tecnologie di proiezione della Hughes-JVC Technology e della divisione DLP della Texas Instruments. Il sistema DLP presentò meno problemi tecnici e ora appare come il capofila del settore: è stato scelto alla fine del 1999 dalla Disney per la presentazione digitale di diversi film, tra i quali *Tarzan*, *Toy Story 2* e *Mission to Mars*.

Un proiettore digitale sfrutta un sistema in tricromia rosso-verde-blu (RGB), proposto da Thomas Young nel 1801, che è alla base della fotografia e della TV a colori. Il proiettore DLP impiega tre dispositivi a microspecchi (DMD), uno per ciascun colore. La luce bianca, ottenuta da una sorgente allo xeno di alta intensità (5000 watt), viene separata da prismi nelle tre componenti monocromatiche, poi indirizzate al rispettivo DMD. Ciascuno di questi è una schiera di 1280 × 1024 specchi controllati in digitale (3 932 160 specchi in tutto!) che riflettono le varie intensità del colore ottenute dal file di dati per proiettare la loro componente dell'immagine.

Un proiettore digitale è grande quanto uno standard per pellicola da 35 millimetri e può fornire la stessa risoluzione. I proiettori digitali del 1999 avevano risoluzioni vicine a 2000 linee orizzontali, con rapporti di contrasto (bianco/nero) di 1000:1, confrontabili con le attuali pellicole a colori da 35 millimetri. Sono prestazioni molto migliori dei parametri richiesti negli Stati Uniti alla TV ad alta definizione. Tuttavia, c'è ancora una bella differenza rispetto agli standard delle grandi produzioni cinematografiche (tipicamente 3000 linee e un rapporto di 1200:1).

Il cinema digitale è promettente anche dal punto di vista finanziario. Oggi, per distribuire un film in tutti gli Stati Uniti occorrono circa 5000 copie a 2000 dollari l'una, senza contare i costi di spedizione; le copie durano circa 30 proiezioni e poi devono essere sostituite. Viceversa, i 19 lettori digitali da 18 gigabyte usati per memorizzare l'originale de *La minaccia fantasma* costano circa 260 000 dollari e durano indefinitamente; e le copie inoltre possono essere realizzate immediatamente e a basso costo.

La distribuzione digitale via satellite o su linee a fibra ottica offrirebbe vantaggi nella spedizione, permettendo la distribuzione simultanea ai cinema. È ciò che è stato dimostrato da Cisco Systems e 20th Century Fox l'estate scorsa alla Supercomm di Atlanta: sono occorse circa due ore su linee ad alta velocità per scaricare il file compresso da 42 gigabyte del film di animazione *Titan A.E.* Ma i benefici riguardano quasi esclusivamente gli studi di produzione, mentre i gestori dei cinema dovrebbero sostenere spese consistenti: i proiettori digitali costano molto più di quelli convenzionali, e la prospettiva di adattare una sala multiplex non entusiasma nessuno.

I proiettori digitali miglioreranno. Il loro destino è questione non di prestazioni tecniche ma di mercato. I gestori dei cinema devono trovare la distribuzione e la proiezione digitale attraenti sotto il profilo artistico ed economico, altrimenti il cinema digitale resterà una promessa. Anche George Lucas, che sta girando e montando il nuovo episodio di *Guerre stellari* con mezzi digitali si aspetta di presentarlo nel solito modo: proiettando un film di celluloide.

PETER D. LUBELL è consulente di telecomunicazioni alla Communications Strategies di Albertson e professore aggiunto alla Polytechnic University di New York.

L'attore digitale è dietro le quinte

Personaggi, scene, interi film sono stati costruiti in digitale. Ma è possibile creare figure umane abbastanza realistiche da poter essere protagoniste di film generati al computer?

di Alvy Ray Smith

Quando, molti anni fa, l'attore Richard Dreyfuss consegnò a me e ai miei colleghi un Academy Award per la tecnica, ci guardò di sbieco sorridendo e ci disse con diffidenza: «Siamo indispensabili gli uni agli altri; non dimenticatelo, uomini che fate *Toy Story*. Stiamo entrando nel XXI secolo insieme... almeno spero!». Gli attori in sala risero, alcuni nervosamente. Il timore di Dreyfuss era alimentato dalla voce secondo la quale gli scienziati del computer che simulano i personaggi di *Toy Story* rimpiazzeranno un giorno gli attori reali, non appena le loro creazioni saranno più simili all'uomo.

Ma Hollywood può stare tranquilla: gli attori non saranno rimpiazzati da esseri generati al computer; i film completamente digitali però esistono e stanno già modificando il ruolo dell'attore.

Toy story, del 1995, è stato il primo film a essere realizzato interamente al computer, cioè senza scene girate dal vivo. Da allora ne sono usciti altri tre: *Z la formica (Antz)*, *Megamicromondo (A Bug's Life)* e *Toy Story 2*, prodotti dalla Pixar Animation per la Disney, tranne *Z la formica*, realizzato dalla Pacific Data Images per DreamWorks. Benché affascinanti e realistici, questi film hanno comunque l'aspetto di cartoni animati. La vera sfida è riuscire a costruire un Richard Dreyfuss o una Julia Roberts digitali verosimili.

L'idea che si possa costruire un personaggio umano convincente senza un attore ci conduce alla controversa questione sulla realtà virtuale. È ovvio che bisogna distinguere tra arte della recitazione e rappresentazione degli attori; e anche in futuro questi ultimi saranno necessari per conferire ai personaggi - interpretati da loro stessi o dalle loro controparti digitali - azioni, espressioni, voci e pensieri credibili.

I mondi in cui essi agiscono, tuttavia, stanno diventando sempre più digitali, e sempre più somiglianti al mondo reale. In *Titanic* ci sono sequenze che non avrebbero potuto essere realizzate senza la grafica computerizzata tridimensionale: la scena che mostra la folla sulla nave che si rovescia e affonda sarebbe stata troppo pericolosa, complicata e costosa da ricreare dal vivo, in una piscina situata in uno studio, o anche con un modello in miniatura. Per il recente film catastrofico *La tempesta perfetta-The Perfect Storm*, i produttori della Industrial Light & Magic hanno realizzato furiose onde da 30 metri che non avrebbero potuto essere filmate dal vivo su un mare in burrasca o simulate in altro modo.

In barba ai progressi tecnici, però, il successo al botteghino di questi film è un'altra questione. Le adolescenti che hanno decretato il trionfo di *Titanic* non hanno riempito le sale per la grafica, ma per Leonardo Di Caprio e il fumettone romantico. Una parte della grafica al computer di oggi è fine a se stessa: apparentemente al pubblico piace, e la produzione di film si adegua. Tuttavia, a mano a mano che la tecnologia avanzerà, si ritornerà alla base: personaggi di spessore e storie valide, in cui i computer saranno usati in modo così sofisticato che il pubblico non se ne accorgerà.

A che punto arriverà la simulazione? Possiamo creare esseri umani verosimili sullo schermo? Costruire una persona completamente simulata significa risolvere problemi enormi, come rappresentare le emozioni, le sfumature fisiche e di comportamento. Un giorno potremmo produrre una Marilyn Monroe artificiale poiché lei, come chiunque altro, è in ultima analisi una «macchina biologica»; ma nessuno può dire se l'attrice virtuale esisterà «realmente» e se sarà in qualche modo diversa da quella reale. Forse finiremo per imbatterci in qualche ostacolo logico insuperabile.

Kevin Bacon dirige Kevin Bacon

Anziché fantasticare a vuoto, cerchiamo di capire quali obiettivi potremmo raggiungere in tempi brevi: ovvero un'integrazione del meglio dei due mondi, umano e digitale, artistico e tecnico.

Sebastian Caine, forse l'essere umano digitale più verosimile mai realizzato, è stato modellato dalla Sony Pictures Imageworks sulle sembianze di Kevin Bacon per *Hollow Man-L'uomo senza ombra*. Per ottenere un risultato così realistico, si è partiti dallo scheletro, al quale si sono poi applicati muscoli virtuali, aggiungendo gli occhi, la pelle e i vasi sanguigni e controllando i movimenti fini delle articolazioni.

Cortesia Sony Pictures Imageworks

© 2000 Warner Bros.

Le terribili acque che inghiottono l'attore Mark Wahlberg in *La tempesta perfetta-The Perfect Storm* sono state simulate dalla Industrial Light & Magic usando programmi di fluidodinamica e di dinamica delle particelle per onde, turbolenza e schiuma; un'ombreggiatura basata su frattali aggiunge grana superficiale e diffonde persino la luce all'interno delle gocce d'acqua.

Nell'animazione tradizionale, utilizzata per grandi classici come *Fantasia* e *Pinocchio*, gli animatori disegnano i personaggi su carta come appaiono ogni tre fotogrammi; poi altri disegnatori - tristemente ribattezzati «riempitori» - aggiungono i fotogrammi mancanti. Ogni disegno è tracciato con inchiostro su una striscia di celluloide, o «cel», e i contorni tracciati vengono riempiti con colori opachi. Nel frattempo un artista disegna lo sfondo. Le cel con i personaggi e lo sfondo sono sovrapposte in modo che siano a registro, e ciascuna combinazione di personaggi e sfondo viene ripresa in un fotogramma da una cinepresa; l'intero processo si ripete migliaia di volte.

L'animazione moderna su celluloide cominciò nel 1990 con il sistema Pixar usato da Disney per realizzare *Bianca e Bernie nella terra dei canguri* (*The Rescuers Down Under*) e altri successi come *Il re leone (The Lion King)*. Con questa tecnica, i disegni a penna e i riempimenti sono sempre eseguiti da disegnatori, ma per tutti gli altri passi si usano i computer. Il vantaggio maggiore è quello di digitalizzare la lavorazione, tenendo conto automaticamente delle centinaia di migliaia di elementi in vari stadi di completamento: un balzo in avanti che fa risparmiare tempo e fatica.

L'animazione su celluloide ha comunque un aspetto bidimensionale. L'animazione in argilla è stata recentemente usata in lungometraggi come *Galline in fuga* nel tentativo di evocare un mondo in tre dimensioni. Gli elementi di ciascun fotogramma sono modellati in argilla e l'animatore deve muovere pazientemente una gamba del personaggio di una frazione di centimetro per ogni fotogramma in modo da farlo camminare.

L'animazione in argilla, tuttavia, non sarà mai realistica perché la statuine rimangono quello che sono. L'animazione tridimensionale al computer (animazione 3-D) è un tentativo di produrre un mondo verosimile senza ricorrere a disegni, modelli o attori umani. Speciali software modellano in termini geometrici i personaggi, gli oggetti e lo sfondo insieme con effetti di ombra e luce e di movimento. Tutti i personaggi, le ambientazioni e gli effetti visivi e sonori sono realizzati in digitale, così come il montaggio e il mixaggio; solo dialoghi e musica sono registrati da persone reali. I fotogrammi sono immagazzinati nel disco rigido di un computer e vengono trasferiti su pellicola una volta completato il film solo se devono essere proiettati nei cinema.

Nei film generati al computer gli animatori costruiscono una persona virtuale a partire dallo scheletro, ricoprendolo di muscoli e pelle, e facendo muovere il personaggio in modo verosimile. Il più complesso esempio di simulazione di un essere umano è quello realizzato in *Hollow Man-L'uomo senza ombra*, in cui compare un Kevin Bacon senza pelle completamente digitale creato da Sony Pictures Imageworks.

Nonostante la riuscita di questo film, ci vorranno altri vent'anni perché un Kevin Bacon plausibile possa essere creato senza riprendere l'attore reale, almeno come modello del suo *alter ego* virtuale. Per generare alcuni degli effetti, Bacon ha dovuto indossare una speciale tuta integrale verde in modo che gli animatori potessero filmare i suoi movimenti e trasferirli al modello virtuale. Ma ciò che più importa è che egli ha interpretato il suo personaggio. Sarà questo il rapporto più probabile fra attore e animatore, uomo e macchina, nei film generati al computer: attori reali consentiranno una rappresentazione realistica di esseri umani, forse anche di loro stessi.

Le capacità di recitazione di animatori e attori possono essere unite. Woody, il cowboy di *Toy Story* e *Toy Story 2*, non è soltanto doppiato da Tom Hanks; sembra agire come lui. Hanks entra nel personaggio quando legge le battute di Woody: i suoi occhi si spalancano per la sorpresa, le spalle si abbassano per la delusione. La Pixar lo ha videoregistrato durante le sessioni di prova, e gli animatori hanno usato le sue espressioni e i suoi movimenti come ispirazione per Woody. In un certo senso, Woody è diventato un Tom Hanks generato al computer.

E qui si apre una nuova e affascinante strada per gli attori. Quando John Lasseter, direttore artistico della Pixar, cerca nuovi animatori, non guarda all'abilità nel disegnare o alla conoscenza della simulazione al computer né tanto meno all'esperienza di programmazione: cerca la capacità di recitazione. In questa prospettiva, un animatore è un tipo speciale di attore che può farci credere che una serie di poligoni colorati abbia un cuore, si arrabbi o sia più furba di una volpe. Non è strano: un attore sullo schermo è un animatore del proprio corpo, capace di farci credere che il corpo, la voce e il pensiero che vediamo sono quelli di una persona completamente differente.

Chiunque abbia giocato a un videogioco di gruppo on-line, come Doom, Quake o Ultima Online, si è identificato in un personaggio grafico: un *avatar*. I giocatori lo fanno senza alcuna difficoltà: molti scelgono addirittura un avatar del sesso opposto, altri preferiscono animali e oggetti. La qualità di queste rappresentazioni virtuali non è molto alta, ma ciò che conta è che dirigere le manifestazioni del proprio avatar è una cosa abbastanza comune. Per i film senza cinepresa, pensiamo a un attore che dirige un avatar di eccellente qualità: un Kevin Bacon che dirige una rappresentazione realistica di Kevin Bacon, capace di eseguire azioni che nella realtà sarebbero troppo pericolose o totalmente fantastiche.

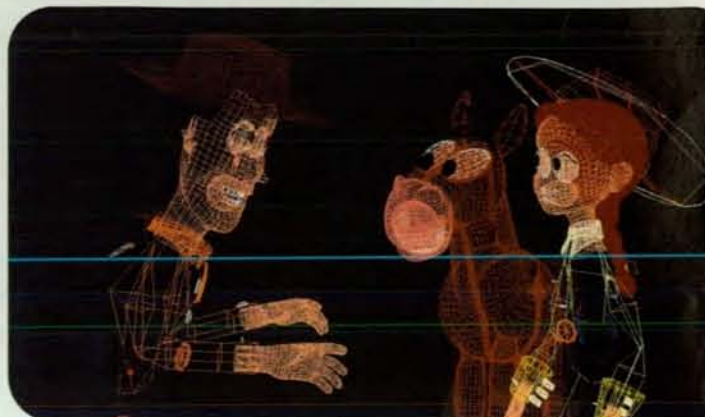
Verso 80 milioni di poligoni

Abbiamo dunque attori, gli animatori, che dirigono rappresentazioni plausibili di esseri umani. Ciò che ancora manca è il realismo: come si può arrivarci? La dinamica della rivoluzione digitale è espressa dalla legge di Moore. Sebbene sia applicata generalmente all'aumento esponenziale della densità dei transistor nei circuiti integrati, si può esprimere in modo più generale: diciamo che tutto ciò che di buono c'è nei computer migliora di 10 volte ogni cinque anni. I progettisti di circuiti pensano che la legge di Moore sarà valida ancora per 10 anni - un ulteriore fattore 100 - prima che una barriera quantistica impedisca altri miglioramenti.

La legge di Moore applicata a un periodo di quattro anni rappresenta un fattore pari a 6. Applicata alle immagini, significa che i 3-17 milioni di poligoni per fotogramma usati nel 1995 per creare la complessità di *Toy Story* avrebbero dovuto diventare 18-102 milioni nel 1999, quando è stato ultimato *Toy Story 2*. Un poligono è la più piccola unità geometrica che viene manipolata. I cineasti digitali costruiscono ogni oggetto e ogni personaggio modellandone la superficie per mezzo di buoni vecchi poliedri euclidei: sfere, cilindri, coni e così via. Spesso si rappresenta una superficie curva approssimandola con poligoni molto piccoli: il loro numero totale è quindi una buona misura della complessità di una scena. Quando eravamo alla Lucasfilm, i miei colleghi Loren Carpenter, Ed Catmull e Rob Cook furono i primi a proporre che 80 milioni di poligoni per fotogramma rappresentassero la «soglia della realtà».

Usando i 24 fotogrammi al secondo dei film, la soglia di realtà è quindi di 1,9 miliardi di poligoni al secondo. I più veloci computer di oggi possono

© 2000 Warner Bros.

Un urto frontale (*inquadratura in basso*) è stato ottenuto sovrapponendo immagini computerizzate (*dall'alto*): una *Andrea Gail* virtuale; la rappresentazione dell'oceano; un'ondata laterale simulata; la prua che incontra l'onda in arrivo; e le lampade sulle alberature.

Pixar Animation

gestire solo qualche milione di poligoni al secondo. Per misurare quanto sia ancora lontano il traguardo del tempo reale, si consideri che *Toy Story* richiedeva in media sette ore di calcolo per fotogramma; anche *Toy Story 2* ha richiesto molte ore per fotogramma, e alcuni dei fotogrammi più complessi arrivavano a 50 ore.

Una volta completato, *Toy Story 2* ha raggiunto una complessità solo doppia rispetto al suo predecessore, con un numero di poligoni per fotogramma tra 4 e 39 milioni. Ciò che *è* aumentato di un fattore 6 in questi quattro anni è stato il tempo di realizzazione per fotogramma, almeno in alcuni casi. Ma anche arrivando a 80 milioni di poligoni per fotogramma non si può dire di aver replicato la realtà: si è solo raggiunto un livello di complessità visiva che i più accettano come «realismo». Del resto, è un errore pensare che il «vero» realismo sia il nostro scopo. I film non sono mai reali: i dialoghi sono costruiti, i set mostrano ambientazioni false, l'illuminazione è artificiale, il montaggio gioca con il tempo.

I miei colleghi avevano calcolato 80 milioni di poligoni considerando ciò che l'occhio umano coglie in un'immagine. Assumiamo che una scena sia suddivisa in una matrice di quadratini, ciascuno rappresentato nel computer da un pixel. Le inquadrature in *Toy Story* e *Toy Story 2* avevano 1,4 milioni di pixel e *Megamicromondo-A Bug's Life* ne aveva 1,8 milioni. *Monster Inc.* ne avrà 2 milioni. Un pixel rappresenta, con un singolo colore, la media di tutti i raggi di luce che colpiscono un quadratino della scena proiettata. Questo fascio di raggi di luce può rappresentare circa quattro livelli di superfici della scena, ognuno dei quali comprende circa otto poligoni. Pertanto, ci sono 32 poligoni per ciascun pixel di un fascio, o 32 milioni di poligoni per ciascun milione di pixel di risoluzione di immagine. Abbiamo considerato inquadrature con 2,5 milioni di pixel; da qui si ricavano 80 milioni di poligoni per inquadratura.

Una nuova realtà

Ma il numero di poligoni varierà con la risoluzione delle immagini. Ciò che occorre è una stima del massimo realismo ottenibile, dalla prospettiva dello spettatore, indipendentemente dal numero di pixel per inquadratura. Secondo questo punto di vista, il conteggio dei poligoni o qualunque altro parametro geometrico conta relativamente. La complessità geometrica non è sinonimo di realismo: ne costituisce solo il 10 per cento. E il resto?

Forma e ombreggiatura, insieme, sono un fattore importante. La forma è un concetto quadridimensionale, che include la geometria di un oggetto o di un personaggio e il suo movimento. La strada alberata di *Toy Story 2* è molto più realistica di quella di *Toy Story* a causa del leggero movimento delle foglie; e ciò contribuisce alla credibilità più dell'accuratezza geometrica di ogni oggetto. L'ombreggiatura include sia l'illuminazione degli oggetti sia il loro materiale e grana superficiale; e la resa dell'illuminazione è un problema particolarmente difficile, in quanto il calcolo diretto in base a modelli fisici è troppo complesso.

Tutte queste difficoltà dovrebbero ridursi quando la legge di Moore avrà portato le ore di tempo di realizzazione a qualche secondo. Ma gli spettatori hanno anche bisogno di accuratezza. Se si guarda una sedia di legno ci si accorge che non è tutta «marrone»: ci sono imperfezioni e macchie. Oggi i problemi relativi alla rappresentazione di esseri umani vengono aggirati con la semplificazione: li si rende banali cartoni per non rischiare di farceli percepire come mostri. Oppure li si rende di proposito mostruosi, come in *Hollow Man-L'uomo senza ombra*. O ancora si preferisce rappresentare animali, come in *Stuart Little-Un topolino in gamba*. Per risolvere questi problemi occorrono nuovi strumenti che diano rappresentazioni dettagliate senza diventare troppo complessi. La simulazione fisica potrebbe essere di aiuto, una volta che le complessità della forma e del moto siano meglio tradotte in protocolli maneggevoli per il computer. Invece di dover animare laboriosamente il funzionamento di un trampolo a molla, si potrebbe usare un programma con un modello del funzionamento di una molla.

Anche digitalizzare un moto reale è importante, come si è fatto in *Hollow Man-L'uomo senza ombra*. Si fa indossare all'attore una tuta speciale con segni di riferimento, lo si riprende mentre compie un'azione complessa e si usano le inquadrature per guidare l'animatore. Questa tecnica funziona, ma non è del tutto compresa: se si campiona semplicemente il movimento punto per punto, il risultato è scadente. Gli animatori hanno compensato questo problema con classici trucchi dell'animazione, ma sarebbe un'ottima cosa avere un software che lo faccia automaticamente.

Una tecnica di rappresentazione basata sull'immagine ci permetterà di misurare la realtà stessa più accuratamente. In genere si usano due metodi differenti per realizzare immagini al computer: uno geometrico (con i poligoni) e l'altro a campionatura (che digitalizza un oggetto in un insieme di pixel). Il luogo in cui questi due mondi s'intersecano è nella rappresentazione basata sull'immagine. Con questo metodo, un cameraman riprende un oggetto da tutte le angolazioni. Ogni inquadratura è digitalizzata: poi il computer ricava per triangolazione il punto in cui ogni pixel colorato si trova nello spazio tridimensionale, creando un modello dell'oggetto, o almeno della sua superficie. Ciò fa evolvere il pixel bidimensionale in un pixel tridimensionale.

La nostra società è sicuramente nel bel mezzo di una rivoluzione dell'intrattenimento. L'animazione comincerà ad avvicinare, se non a soppiantare, l'azione dal vivo. Hollywood è pronta? Forse no, a giudicare dalle reazioni seguite a false voci secondo cui il regista e sceneggiatore Andrew Niccol avrebbe utilizzato una protagonista generata al computer per affiancare Al Pacino in *Simone*.

Attori e avatar sono cose separate. I cineasti digitali stanno rimpiazzando le rappresentazioni, non la recitazione; il talento recitativo sarà sempre fondamentale. Il problema essenziale diventa quello di interfacciare l'attore al modello realistico e adattarlo a un modo diverso di recitare. Sono occorsi 20 anni dalla concezione iniziale per arrivare al primo film completamente generato al computer. Forse i prossimi 20 anni ci porteranno film completamente verosimili girati senza cinepresa: creati insieme da artisti e tecnici.

Lo sviluppo di una scena di *Toy Story 2* comprendeva (*da sinistra a destra*) lo schizzo originale a matita; una grossolana resa al computer dei personaggi, con strutture «a bastoncino» o con contorni; una raffigurazione con poligoni colorati, tipicamente piccoli triangoli e quadrilateri (*non visibili*); e la rappresentazione finale con risoluzione adatta allo schermo di un cinematografo, con tutti gli effetti di luce e di grana.

Pixar Animation

La verosimiglianza è aumentata notevolmente da *Toy Story* a *Toy Story 2*. La complessità geometrica è raddoppiata, e il tempo di calcolo è aumentato di un fattore 10, per migliorare l'illuminazione e la resa delle superfici nonché per aggiungere piccoli movimenti, come l'ombreggiare delle foglie, che aumentano di molto il senso di realtà.

ALVY RAY SMITH, cofondatore della Pixar Animation, è un fotografo digitale di Seattle. Laureato in informatica, è stato direttore delle ricerche di grafica al computer alla Lucasfilm e ha lavorato alla Microsoft, sempre sulla grafica. Ha ottenuto due Academy Award per realizzazioni tecniche.

DAMASIO ANTONIO, *The Feeling of What Happens: Body and Emotion in the Making of Consciousness*, Harcourt Brace, 1999.

ROBERTSON BARBARA, *Building a Better Mouse* in «Computer Graphics World», 22, n. 12, dicembre 1999.

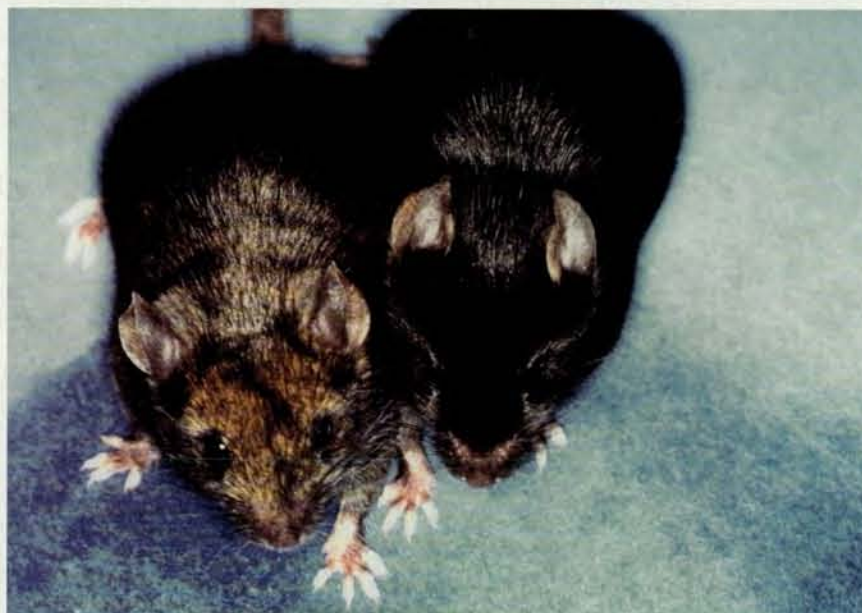
ROBERTSON BARBARA, *Visible Difference* in «Computer Graphics World», 23, n. 7, luglio 2000.

Film di alto contenuto in grafica ed effetti speciali:

Bianca e Bernie nella terra dei canguri (Disney, 1990); *Il re leone* (Disney, 1994); *Toy Story* (Disney, 1995); *Titanic* (Fox-Paramount, 1997); *Megamicromondo* (Disney, 1998); *Z la formica* (DreamWorks, 1998); *Stuart Little-Un topolino in gamba* (Sony, 1999); *Toy Story 2* (Disney, 1999); *Galline in fuga* (DreamWorks, 2000); *L'uomo senza ombra* (Sony, 2000); *La tempesta perfetta-The Perfect Storm* (Warner, 2000).

Verso una terapia genica del cancro

Il cancro mammario e le sue metastasi possono essere combattuti mediante inibitori dell'angiogenesi; lo suggeriscono gli esperimenti condotti sugli animali transgenici

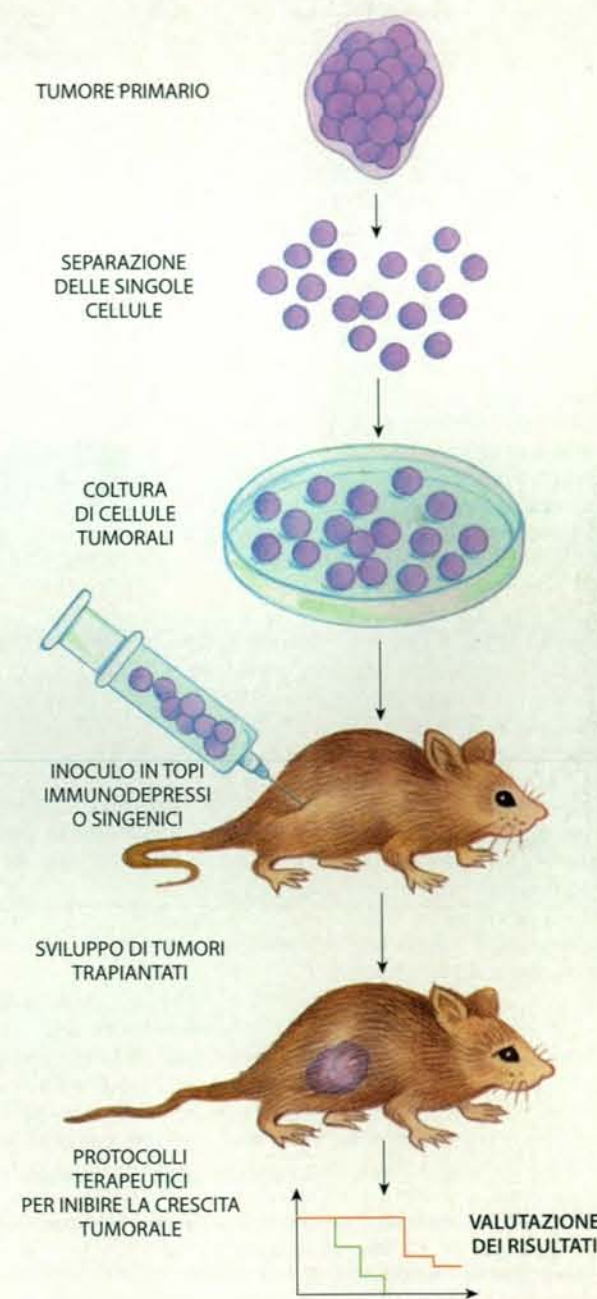
di Maria Grazia Sacco, Enrica Mira Catò e Paolo Vezzoni

Gli animali transgenici sono stati introdotti nella ricerca biomedica da oltre venti anni e si sono dimostrati utili nei settori più svariati, dalla ricerca di base alla produzione di farmaci, sollevando presso l'opinione pubblica una serie di domande e preoccupazioni in parte fondate, ma troppo spesso affrontate con affermazioni imprecise o addirittura volutamente tendenziose.

In ogni campo della vita, costi e benefici vanno sempre pesati attentamente. Non discuteremo qui il ruolo degli animali nella ricerca biomedica, aspetto già ampiamente trattato su questa rivista, in particolare nel fascicolo del febbraio 1997. Vorremmo invece proporre un ulteriore esempio dell'utilità di queste tecnologie per indagare un problema di grande interesse quale la ricerca di nuove terapie contro il cancro.

Gli ultimi anni hanno visto enormi progressi nella comprensione dei meccanismi alla base della trasformazione e della crescita tumorale. Sono stati identificati geni la cui attivazione (nel caso degli oncogèni) o inattivazione (nel caso dei soppressori tumorali) provoca il cancro e altri che contribuiscono alla capacità di dare metastasi. In patologia umana la diagnosi strumentale permette di evidenziare tumori in fase assai precoce, mentre la classificazione istopatologica è diventata altamente precisa e sofisticata. Tuttavia a tali avanzamenti non ha fatto riscontro un corrispondente miglioramento della capacità di trattare i tumori, nonostante oggi si disponga di tecniche potenzialmente assai promettenti.

Il problema della sperimentazione

Questo proliferare di nuovi approcci al trattamento dei tumori non può che essere valutato attraverso modelli animali ai quali si richiede un'elevata affidabilità. Anni fa, quando, presso il nostro laboratorio dell'Istituto di tecnologie biomediche avanzate (ITBA) del CNR di Segrate coordinato da Renato Dulbecco, abbiamo iniziato a interessarci alla possibilità di utilizzare i nuovi dati della genetica molecolare per inibire la crescita tumorale, il problema della scelta del modello ci è subito apparso centrale. (In quegli anni le nostre ricerche rientravano nell'ambito del Progetto finalizzato «Oncologia» del CNR, di un Progetto coordinato dall'Associazione italiana per la ricerca sul cancro, ed erano in gran parte finanziate dalla Cariplo.) Sorprendentemente, però, avevamo constatato che tale problema era assolutamente ignorato nell'ambito dell'oncologia sperimentale.

La stragrande maggioranza dei modelli utilizzati si basa su sistemi assolutamente artificiali quali i tumori trapiantabili, cioè linee tumorali coltivate in laboratorio e poi inoculate in ceppi particolari di animali singenici o immunodepressi sui quali viene valutata l'efficacia degli interventi terapeutici. In realtà il modello ha poco o nulla a che fare con quanto accade in patologia umana, dov il processo tumorale è un processo che avviene attraverso vari passaggi durante i quali il genoma di una o al massimo di poche cellule subisce una serie di mutazioni che hanno come risultato finale l'invasione dei tessuti circostanti e la metastatizzazione a distanza. Durante questo processo la singola cellula deve adattarsi al suo microambiente, eludendo i segnali delle cellule

La maggior parte degli studi di oncologia viene svolta su ceppi di topi immunodepressi o immunologicamente compatibili in cui vengono inoculate cellule ottenute da tumori primitivi. Sul tumore che si sviluppa vengono poi messe alla prova le varie terapie. L'efficacia del trattamento viene valutata confrontando la crescita dei tumori rispetto a topi controllo. Nella pagina a fronte, in alto, microiniezione di cellule in una blastocisti; in basso, topi ottenuti con questa procedura. Quello di sinistra è chiaramente chimerico, cioè derivato in parte dalle cellule iniettate.

circostanti, aggirare il controllo del sistema immunitario, superare le barriere fornite dai vari strati di tessuti che la circondano, invadendoli, entrare nei capillari linfatici e sanguigni, viaggiare per lunghi tratti, fermarsi nei vari tessuti e dare origine alle metastasi con un complicato processo che richiede, tra l'altro, la formazione di nuovi vasi.

Tutto questo ha poco a che fare con l'inoculo di numerose cellule tumorali generalmente in zone, come lo strato sottocutaneo, il peritoneo o il torrente circolatorio, che non sono l'ambiente in cui il tumore cresce normalmente. Inoltre, queste cellule sono state mantenute in coltura, in vari laboratori, per un tempo indefinito ed è assai dubbio che rappresentino ormai il tumore da cui sono derivate. Infatti, durante la coltura, avviene una serie di nuovi adattamenti e di alterazioni genetiche impossibili da tenere sotto controllo. Inoltre, particolare assai importante, la maggior parte dei tumori di questo genere non dà origine a metastasi.

Si capisce quindi come si possa legittimamente mettere in dubbio la rilevanza di questi modelli per la valutazione di nuove strategie terapeutiche. Questi sistemi sono sopravvissuti per via della loro comodità per lo sperimentatore. Entro limiti ragionevoli, i tumori che vengono inoculati negli animali nello stesso esperimento sono abbastanza simili tra loro, il che semplifica l'analisi statistica dei dati, mentre i tumori spontanei o indotti da cancerogeni sono rari, eterogenei e insorgono generalmente in topi più vecchi, il che richiederebbe tempi di osservazione più lunghi e un gran numero di animali per la valutazione.

I vantaggi offerti dai topi transgenici

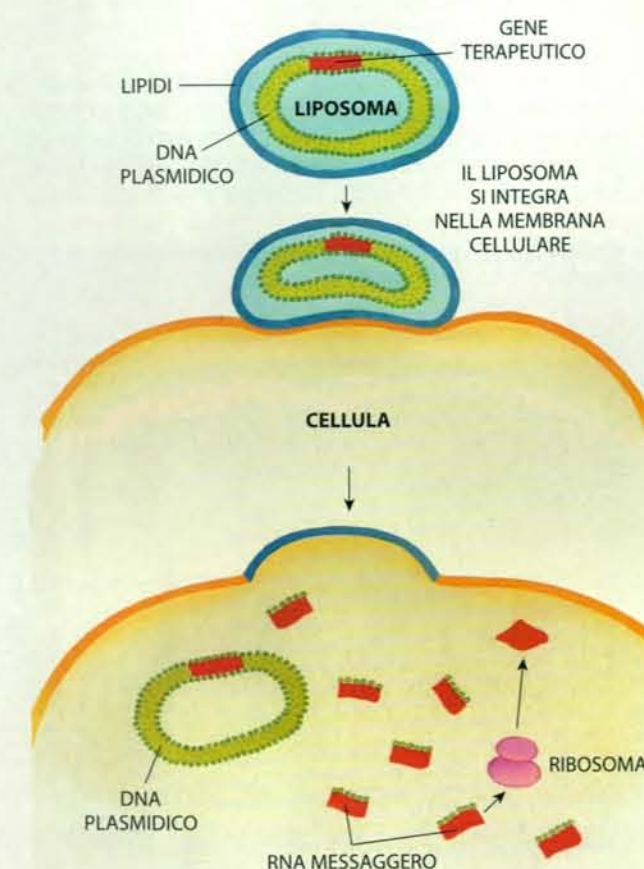
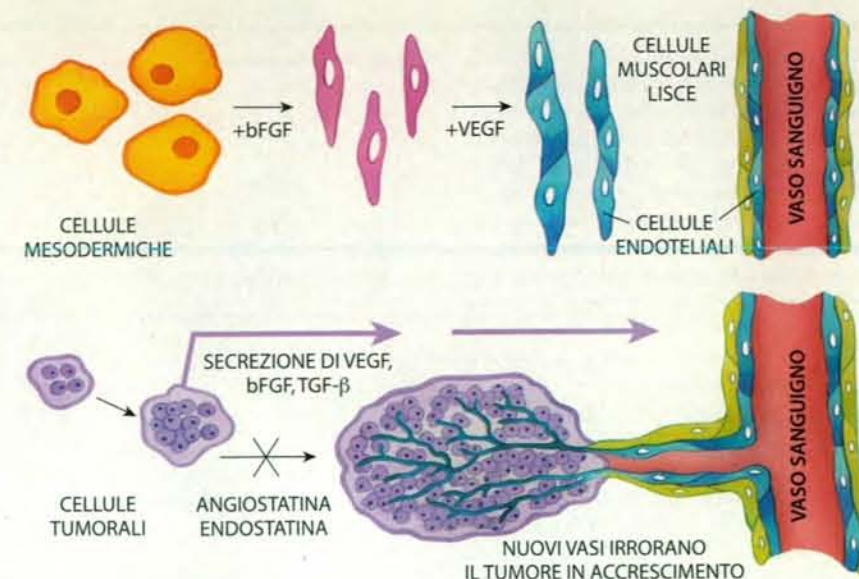
L'inadeguatezza di questi sistemi, che pure costituiscono il 99,9 per cento degli esperimenti riportati in letteratura, ci ha indirizzato verso la scelta di un modello diverso. A partire dagli studi di Phil Leder, è diventato chiaro che è possibile far insorgere tumori in animali da esperimento se l'espressione di particolari geni viene forzata in un particolare tessuto. Il primo topo di Leder portava l'oncogène *c-myc* sotto il controllo di sequenze regolatrici in grado di farlo esprimere ad alti livelli nella ghiandola mammaria. Questo topo, detto anche topo di Harvard od *oncomouse*, divenne famoso in quanto fu il primo organismo transgenico per cui si chiese e si ottenne il brevetto. In ess però i tumori della mammella insorgevano in maniera sporadica e con lunga latenza. Per questo abbiamo preferito puntare la nostra attenzione su un topo transgenico per l'oncogène *neu*, messo a punto da W. J. Muller nel laboratorio di Leder, e lo abbiamo riprodotto nel nostro laboratorio.

L'oncogène *neu* sembrerebbe coinvolto nella patogenesi del carcinoma mammario umano e una sua amplificazione porta a una maggior malignità della neoplasia. In questi topi i tumori mammari insorgono nel 100 per cento delle femmine in tutte le ghiandole mammarie, con elevata riproducibilità nel tempo e in maniera simmetrica; diventano palpabili generalmente verso il secondo mese per crescere poi con una certa rapidità, fino ad arrivare verso il quinto mese a una dimensione tale da richiedere il sacrificio dell'animale. Inoltre crescono nel loro microambiente naturale, cui devono adattarsi per superare l'inibizione costituita da altre cellule confi-

PRONUCLEO FEMMINILE
PRONUCLEO MASCHILE
RECUPERO DEGLI EMBRIONI
MICROINIEZIONE DI DNA NEL PRONUCLEO MASCHILE
EMBRIONE TRANSGENICO
IMPIANTO DEGLI EMBRIONI MICROINIETTATI NELL'UTERO DI FEMMINE PSEUDOGRAVIDE
TOPINO TRANSGENICO
TOPINI NORMALI
SVILUPPO DI TUMORI SPONTANEI
PROTOCOLLI TERAPEUTICI PER INIBIRE LA CRESCITA TUMORALE
VALUTAZIONE DEI RISULTATI

Non sempre i risultati ottenuti con i tumori impiantati nei topi sono applicabili all'uomo. Una valida alternativa potrebbe essere fornita dagli animali transgenici che, come mostra lo schema, si ottengono introducendo, mediante microiniezione, un gene particolare nell'embrione di topo allo stadio di una cellula. Alcuni degli animali così ottenuti presenteranno questo gene in tutte le cellule dell'organismo adulto. Conoscendo i geni responsabili della patogenesi dei tumori umani è possibile progettare animali transgenici che sviluppino tumori di un particolare tipo. Per esempio, inserendo l'oncogène *neu* si ottengono topi che, sviluppando tumori simili al carcinoma della mammella umano, inclusa la capacità di dare metastasi, si prestano bene allo studio di efficaci terapie.

Per poter crescere oltre una certa dimensione il tumore deve sviluppare nuovi vasi che possano nutrirlo adeguatamente. Questo processo avviene normalmente durante lo sviluppo e, in condizioni patologiche, anche nell'adulto, per esempio durante la crescita tumorale. Sono stati già identificati molti dei fattori coinvolti in questo processo, come il bFGF (basic Fibroblast Growth Factor) e il VEGF (Vascular-Endothelial Growth Factor). Si ritiene che a un certo punto della sua crescita il tumore acquisisca la capacità di secernere questi o simili fattori che stimolano la crescita di vasi al suo interno. Gli inibitori della crescita di cellule endoteliali, come l'angiostatina e l'endostatina, bloccano questo processo impedendo la crescita di vasi e quindi la crescita neoplastica. Tale proprietà potrebbe avere grandi risvolti nella terapia dei tumori.

GENE TERAPEUTICO
LIPIDI
LIPOSOMA
DNA PLASMIDICO
IL LIPOSOMA SI INTEGRA NELLA MEMBRANA CELLULARE
CELLULA
RIBOSOMA
DNA PLASMIDICO
RNA MESSAGGERO

Gran parte dei tentativi di terapia genica nell'uomo fa uso di vettori virali, ossia di sistemi che utilizzano virus presenti in natura e, dopo averli modificati, fa in modo che questi portino all'interno delle cellule il gene che si vuole introdurre. La metodica non è però del tutto sicura, come ha dimostrato il decesso negli Stati Uniti di un paziente trattato con una dose molto elevata di un vettore adenovirale. Per questo i liposomi, collaudati nell'uomo da lungo tempo, sono una valida alternativa. Il DNA genico da trasferire viene associato a particolari vescicole lipidiche che possono aderire e fondersi con la membrana cellulare, rilasciando così all'interno delle cellule il DNA in esse contenuto.

nanti e dalle cellule di altri tessuti nonché dalle cellule del sistema immunitario. La notevole riproducibilità delle neoplasie nelle varie generazioni consente di pianificare gli esperimenti con una certa facilità e di confrontare tra loro trattamenti effettuati in tempi diversi. Infine, il tumore dà origine a metastasi a distanza, la vera causa di morte per il cancro della mammella in campo umano. Questo spiega il vantaggio di disporre di un modello animale in cui valutare l'effetto delle terapie sulle metastasi.

Come si può arrivare a una terapia genica dei tumori

Nel corso degli ultimi dieci anni, la terapia genica si è avvalsa di una varietà di approcci che hanno preso in considerazione diversi aspetti della fisiologia, della biochimica e della genetica dei tumori. In generale però, dopo dieci anni di tentativi anche in campi diversi dall'oncologia, i sistemi di trasferimento (anche i più promettenti quali gli adenovirus) si sono rivelati poco efficaci. Si è visto, infatti, che sono solo poche le cellule che esprimono il gene desiderato per un tempo sufficientemente lungo e a livelli terapeuticamente utili.

Nel caso del cancro, poi, il problema sembra ancora più complesso per non dire insormontabile. È noto che, con la chemioterapia, si può ottenere la scomparsa del 99,99 per cento delle masse tumorali, ma che a distanza di tempo il tumore può ricrescere. Come è possibile quindi sperare di ottenere un effetto duraturo utilizzando procedure che sono ben lontane dal trasformare percentuali di cellule così elevate? Se non riusciamo a inserire i geni «terapeutici» non dico in tutte ma almeno in una consistente parte delle cellule, che effetto potremo mai avere? Malgrado ciò, sono stati effettuati nell'uomo numerosi studi di questo genere, con risultati in effetti scarsi.

Tuttavia vi sono due approcci che potenzialmente superano il problema. Il primo è quello immunologico, che potrebbe essere in grado di distruggere tutte le cellule tumorali anche se venisse geneticamente modificata solo una piccola porzione di cellule, in quanto il sistema immune è in grado di amplificare la risposta. La speranza riposta in vaccini o altre manovre che inducano l'organismo a rigettare il tumore risale agli albori dell'oncologia moderna. Negli anni settanta, molti reagenti che stimolavano aspecificamente il sistema immunitario, quali il vaccino antitubercolare (BCG), conob-

bero periodi di grande utilizzo, anche se ora sono praticamente abbandonati. Negli anni ottanta Steven A. Rosenberg e i suoi collaboratori avevano acceso molte speranze con un sistema in cui si cercava di attivare le cellule linfoidi del paziente stesso a reagire contro il tumore (si veda l'articolo *Immunoterapia adottiva contro il cancro* di S. A. Rosenberg in «Le Scienze» n. 263, luglio 1990). Ma le numerose sperimentazioni basate su questa ipotesi e i vari trial clinici non riuscirono a dare risultati soddisfacenti.

Il secondo approccio, che potrebbe funzionare anche se il trasferimento genico avvenisse in maniera incompleta, si basa sugli studi ormai trentennali di Judah Folkman (si veda il suo articolo *Combattere il cancro attaccandone la vascolarizzazione* in «Le Scienze», n. 339, novembre 1996). L'ipotesi esposta nell'articolo ha avuto un recente rilancio in concomitanza con l'isolamento dell'angiostatina e dell'endostatina, due molecole prodotte dall'organismo stesso a partire dai loro precursori, che si sono dimostrate in grado di ridurre o bloccare la crescita tumorale.

Su che principio si basa l'efficacia di queste molecole? Secondo il paradigma ufficiale, le prime cellule neoplastiche si formano e si duplicano come le altre cellule del tessuto da cui sono derivate, ma, raggiunta una certa massa critica, devono, per poter crescere ulteriormente, stimolare la crescita di nuovi vasi per avere il necessario nutrimento. Come questo avvenga costituisce uno dei settori d'indagine più stimolanti dell'oncologia molecolare. La produzione di nuovi vasi sembrerebbe essere il risultato dell'attività di fattori attivanti e inibenti la proliferazione delle cellule endoteliali che costituiscono le pareti dei vasi.

Negli studi iniziali Folkman aveva somministrato ad animali con tumori trapiantati queste proteine purificate più o meno come si fa per un normale farmaco, ottenendo la ripetuta regressione del tumore fino addirittura al suo controllo completo anche quando la terapia veniva sospesa.

La notizia, che fece il giro del mondo, non può essere sottovalutata. La terapia non risultava per niente tossica, sembrava avesse un effetto definitivo e il tumore non sviluppava resistenza, come invece si verifica regolarmente con i chemioterapici tradizionali. Studi successivi hanno sollevato tuttavia due problemi: il primo riguarda l'estrema difficoltà di ottenere questi farmaci come proteine, che devono essere purificate dagli organismi stessi o venire prodotte con tecniche di ingegneria genetica. Una possibilità fornita dalla terapia genica era quella di far produrre le proteine dall'organismo stesso portatore di tumore. In effetti, per la somministrazione giornaliera nell'uomo, che pesa oltre 1000 volte un topo, non si sarebbe al momento in grado di disporre di materiale sufficiente.

Primi risultati delle terapie geniche

Rimaneva poi il problema se il modello utilizzato non fosse troppo ottimistico per le ragioni che abbiamo già esposto. Negli ultimi cinque anni, abbiamo utilizzato il nostro modello di topo transgenico per l'oncogène *neu* per provare varie strategie di terapia genica antitumorale. Abbiamo così testato i geni suicidi, gli antisenso, le connessine (che rafforzano il contatto tra le cellule). In tutti i casi abbiamo osservato una parziale riduzione della crescita tumorale a livello locale, senza tuttavia ottenere una completa scomparsa del tumore e un effetto sistemico a distanza. Con l'interleuchina 4, una molecola che stimola il sistema immunitario, abbiamo ipotizzato anche un effetto a distanza sul tumore controlaterale o addirittura sulle metastasi. Quest'ultimo parametro è stato pertanto valutato, senza che si sia notato un effetto di sicuro significato sulla crescita delle metastasi polmonari. Questi risultati sono assai simili a quelli riportati per l'uomo, in cui generalmente si ottengono solo regressioni parziali.

Il trattamento mediante angiostatina ed endostatina dovrebbe invece avere un effetto su tutto l'organismo. Queste proteine esercitano infatti la loro azione non all'interno della cellula, ma nel torrente circolatorio e quindi possono venir somministrate come un farmaco tradizionale. Inoltre, la loro azione non sarebbe quella di eliminare completamente le cellule tumorali, bensì di impedirne la crescita oltre una certa dimensione. Pertanto esse potrebbero venire prodotte da un numero limitato di cellule, anche non tumorali, producendo un effetto che si ripercuoterebbe su tutto il tumore e potenzialmente anche sulle sue metastasi.

Abbiamo così trattato gli animali con un vettore d'espressione veicolato da liposomi all'interno delle cellule. La scelta dei liposomi ha alcuni vantaggi nei confronti dell'impiego nell'uomo: essi sono già utilizzati in clinica e cosmesi, non presentano alcuna controindicazione medica né effetti collaterali; inoltre possono essere utilizzati anche in strutture tecnologicamente non molto avanzate.

La strategia antitumorale che fa uso dei geni suicida si basa sul principio di inserire nelle cellule tumorali geni tossici per la cellula. Tra questi, il più usato è quello che sfrutta alcune proprietà della timidina chinasi (TK) del virus herpes simplex. Tale enzima è deputato alla fosforilazione della timidina, il nucleoside da cui si ottiene il TTP (timidina trifosfato) che viene poi incorporato nel DNA cellulare. In pratica, la TK è uno degli enzimi che produce i mattoni che la DNA polimerasi usa per replicare il DNA e quindi è indispensabile per la crescita sia delle cellule normali, sia di quelle neoplastiche. Tuttavia, a differenza della TK dei mammiferi, quella virale fosforila non solo la timidina, ma anche alcuni suoi analoghi che provocano gravi alterazioni nel DNA, così che la cellula in replicazione viene danneggiata irreparabilmente. Pertanto si possono indurre le cellule tumorali a «suicidarsi» inserendo in esse il gene per la TK virale e poi somministrando loro uno di questi analoghi come il ganciclovir, che invece non danneggia le cellule normali prive dell'enzima virale.

È possibile che la proliferazione del tessuto tumorale avvenga quando la sorveglianza normalmente esercitata dal sistema immunitario viene elusa da alcune caratteristiche delle cellule tumorali. Gli approcci basati su questa ipotesi fanno in modo di stimolare il sistema immunitario affinché reagisca contro i tumori. Agli esperimenti condotti da parecchi decenni, si affiancano ora procedure di terapia genica. I geni che inducono la produzione di molecole che stimolano la risposta immunitaria, le citochine, vengono introdotti nelle cellule tumorali che così richiamano le cellule coinvolte nella distruzione di cellule tumorali, quali linfociti, macrofagi ed eosinofili. Si spera in tal modo o di distruggere in maniera generica le cellule tumorali o di «smascherare» gli antigeni tumorali in modo che, a loro volta, provochino una forte risposta immunitaria selettiva.

I trattamenti degli animali sono iniziati a due mesi di età inoculando i liposomi all'interno del tumore e l'effetto è stato valutato tre mesi dopo. I risultati sono stati positivi anche rispetto a quelli ottenuti nei topi trattati con i precedenti approcci di terapia genica.

Bloccare le metastasi

Ma i risultati più significativi sono stati ottenuti analizzando le metastasi. Circa il 75 per cento dei topi transgenici non trattati sviluppa metastasi a 5 mesi di età. Al contrario nessuno dei topi trattati con angiostatina ha presentato metastasi all'autopsia eseguita alla stessa età. Si tratta di un risultato che dimostra, per la prima volta e in un modello spontaneo, la possibilità di modificare il decorso delle metastasi attraverso una terapia basata sugli inibitori dell'angiogenesi.

Come sempre nella ricerca, i risultati vanno letti per quello che sono e le generalizzazioni devono essere prudenti. Quello che lo studio ha dimostrato è che in un modello di carcinoma mammario relativamente simile a quello umano un trattamento abbastanza precoce con angiostatina ha rallentato la comparsa di metastasi. Ciò non vuol dire che la terapia sia in grado di eliminare o rallentare il decorso di metastasi già stabilite. Al contrario, gli studi finora pubblicati mostrano che angiostatina ed endostatina sono tanto più efficaci quanto più somministrate precocemente.

In base a questi dati, pertanto, sembra che la terapia possa dimostrarsi utile, in un contesto umano, come terapia adiuvante dopo la rimozione del tumore. Attualmente, la maggior parte delle neoplasie mammarie nella donna viene diagnosticata quando esse sono circoscritte al seno, e per questo motivo il tumore viene escisso in maniera apparentemente radicale. Tuttavia si sa che in una certa percentuale di casi, a distanza di qualche anno, si manifesteranno metastasi in organi vitali per l'organismo. Oggi le pazienti che hanno una probabilità maggiore di recidiva sono trattate con la chemioterapia «preventiva», somministrando cioè farmaci antitumorali prima che le metastasi si manifestino, nella speranza di eliminare tutte le cellule potenzialmente già in circolo.

Tali composti presentano un certo numero di effetti collaterali, oltre a essere per loro stessa natura potenzialmente cancerogeni. Al contrario, la terapia con angiostatina sembra finora ben tollerata, anche se non è detto che con un uso più diffuso non si rivelino problemi diversi. Tuttavia, agendo su meccanismi differenti, questi inibitori potrebbero rappresentare un ulteriore presidio terapeutico i cui benefici andrebbero a sommarsi a quelli forniti dalle terapie tradizionali.

Nella scienza ogni piccolo passo va documentato con precisione ed esattezza. Per questo motivo stiamo cercando di migliorare il modello animale transgenico attualmente disponibile per renderlo ancora più simile a quello umano per studi preclinici. L'aumento delle nostre conoscenze nella genetica della trasformazione tumorale ci consentirà sempre più di riprodurre nel roditore gli stessi meccanismi patogenetici che avvengono nell'uomo, così da ottenere modelli che più si avvicinino a quelli che sono realmente i tumori umani.

PAOLO VEZZONI, MARIA GRAZIA SACCO ed ENRICA MIRA CATÒ sono ricercatori presso l'Istituto di tecnologie biomediche avanzate del CNR di Segrate (Milano) nell'ambito del Progetto Genoma. Oltre a identificare i geni responsabili di varie malattie, il gruppo dell'ITBA ha introdotto la tecnologia degli animali transgenici in Italia. Tra i risultati ottenuti vi è la produzione di topi transgenici per lo studio di composti tossici e la messa a punto di un modello transgenico per la validazione di procedure di terapia genica del cancro.

DULBECCO R., RAINERI P., VEZZONI P., FARIELLO R., *Clonazione: problemi etici e prospettive*, supplemento a «Le Scienze», n. 345, maggio 1997.

SACCO M.G., CANIATTI M., MIRA CATÒ E., FRATTINI A., CHIESA G., CERUTI R., ADORNI F., ZECCA L., SCANZIANI E. e VEZZONI P., *Liposome-Delivered Angiostatin Strongly Inhibits Tumor Growth and Metastatization in a Transgenic Model of Spontaneous Breast Cancer*, in «Cancer Research», 60, pp. 2660-2665, 2000.

Clonare l'arca di Noè

La biotecnologia potrebbe salvare le specie minacciate dall'estinzione

di Robert P. Lanza, Betsy L. Dresser e Philip Damiani

DigitalVision

Nel novembre 2000 una comune vacca dello Iowa ha partorito un esemplare di una specie in via d'estinzione grazie alla clonazione. Il piccolo, chiamato Noè, è un gaur, rarissimo bovide originario dell'India, dell'Indonesia e del Sudest asiatico. Di questo bovino del peso di una tonnellata, troppo cacciato nel passato, restano circa 36 000 esemplari, anche a causa della riduzione del suo habitat, costituito da foreste, giungle di bambù e praterie. Nella «lista rossa» della IUCN (International Union for the Conservation of Nature) il gaur è una specie in pericolo e la Convenzione sul commercio internazionale delle specie in pericolo (CITES) vieta il commercio dell'animale vivo e dei suoi derivati (corna, pelle e zoccoli).

Il fatto più importante è la dimostrazione che un animale può partorire un clone, cioè il duplicato genetico, di un animale di un'altra specie. Noè è la prima creatura dell'arca delle specie in pericolo che noi scienziati stiamo cercando di clonare: ci sono progetti per clonare il bongo - un'antilope africana di media taglia con strisce verticali bianche - la tigre di Sumatra e il panda gigante, tanto caro agli zoo quanto difficile da far riprodurre. La clonazione potrebbe riportare in vita specie estinte come il bucardo, capra delle regioni montuose della Spagna. L'ultimo bucardo, una femmina, è morto con il cranio fracassato dalla caduta di un grosso albero all'inizio del 2000, ma se ne sono conservate alcune cellule.

I progressi nella clonazione consentono di conservare e riprodurre le specie in pericolo che difficilmente si riproducono in cattività e di reintrodurle negli habitat originari. Il grosso vantaggio della clonazione è che permette ai ricercatori di introdurre nuovi geni nel pool genico di una specie di cui siano rimasti pochi esemplari. La maggior parte degli zoo non è attrezzata per la raccolta e la conservazione dello sperma e le uova, oltre a essere difficili da estrarre, non possono venire congelate. Ma clonando animali di cui siano state conservate cellule, gli scienziati possono conservarne in vita i geni, mantenendo (e in alcuni casi aumentando) la diversità genetica delle popolazioni di una specie a rischio.

Tuttavia alcuni biologi conservazionisti hanno impiegato molto a comprendere l'importanza delle strategie riproduttive della riproduzione assistita, per esempio della fecondazione *in vitro*, e di fronte alla clonazione sono rimasti perplessi. Ovviamente anche noi siamo convinti che debba essere fatto qualsiasi sforzo per conservare l'habitat naturale e quindi la biodiversità, ma in alcuni casi la battaglia è già stata persa e i risultati appaiono devastanti. Certo, la clonazione non è una panacea, ma offre solo l'opportunità di salvare alcune specie, contribuendo al mantenimento della biodiversità.

Anche un clone, comunque, necessita di una madre e ben pochi conservazionisti accetterebbero di concentrare a questo scopo le femmine selvatiche di specie a rischio o di tenerne esemplari in cattività per sottoporli a tecniche quali la fecondazione assistita o la madre surrogata. Ciò significa che, per clonare una specie a rischio, noi ricercatori dobbiamo risolvere il problema di come riuscire a ottenere dalle cellule di due specie diverse il clone di una.

È nato un gaur

A descriverlo, il processo di clonazione appare ingannevolmente semplice. Si introduce un microago in un uovo estratto dalle ovaie, attraversando lo strato protettivo, la zona pellucida. Con movimento deciso se ne aspira il nucleo, che contiene la maggior parte del materiale genetico della cellula, lasciando in situ il citoplasma; con un secondo ago, si inietta poi il contenuto della cellula da clonare all'interno dell'uovo. Sotto la stimolazione di impulsi

elettrici si ottiene la fusione tra la cellula introdotta e l'uovo ed è possibile seguire le prime fasi della divisione dell'embrione formatosi. In pochi giorni si otterrà una massa di cellule abbastanza grande da poter essere impiantata nell'utero di una madre surrogata, trattata in precedenza con ormoni. Quella madre darà alla luce il clone.

Nella pratica, tuttavia, questa tecnica (detta di trasferimento nucleare) non è così facile. Per creare Noè noi dell'Advanced Cell Technology (ACT) di Worcester, nel Massachusetts, abbiamo fuso cellule epiteliali di un maschio di gaur con 692 uova di vacca denucleate. Come abbiamo riferito nell'ultimo numero del 2000 della rivista «Cloning», dei 692 embrioni ottenuti per clonazione solo 81 sono arrivati allo stadio di blastocisti, struttura sferica costituita da un centinaio di cellule, capace di impiantarsi nell'utero. Siamo riusciti a introdurre 42 blastocisti in 32 mucche, ma solo otto di queste sono rimaste gravide. Da due delle vacche gravide abbiamo prelevato il feto a scopo di analisi; quattro vacche hanno subito un aborto spontaneo tra il secondo e il terzo mese (la gravidanza dura nove mesi); la settima ha abortito spontaneamente e inaspettatamente in agosto.

Le statistiche sull'efficacia della clonazione riflettono il fatto che questa tecnica è ancora più arte che scienza, soprattutto se si impianta l'embrione in una specie diversa. I tassi di successo più elevati si sono ottenuti, anche all'ACT, clonando una vacca nel corpo di un'altra vacca. Ma anche in questo caso è arduo riuscire a ottenere qualche animale. Su 100 uova di vacca fuse con cellule adulte della stessa specie, soltanto il 15-20 per cento arriva allo stadio di blastocisti; e di queste solo il 10 per cento, cioè una o due, riesce a dar vita a un neonato vivo. Questi numeri riflettono le difficoltà tecniche del trasferimento nucleare.

Riteniamo quindi che le prime specie a rischio da sottoporre a clonazione siano quelle di cui si conosce bene il processo riproduttivo. Alcuni zoo o società conservazionistiche - come l'Audubon Institute Center for Research of Endangered Species (AICRES) di New Orleans, diretto da uno di noi (Dresser) - hanno studiato con un certo successo la biologia riproduttiva di diverse specie in pericolo. Nel novembre scorso la Dresser e colleghi hanno reso noto il primo successo di trapianto eterologo dell'embrione congelato di un animale a rischio: un gatto domestico ha partorito un gatto selvatico africano, contribuendo alla salvaguardia di una specie in parziale declino.

Oltre al gatto selvatico africano e al gaur, sono stati effettuati trasferimenti interspecifici di embrioni in altri quattro casi: un gatto del deserto dell'India in un gatto domestico, un bongo in un'antilope alcina, un muflone in una pecora e un raro wapiti in un cervo della Virginia. In tutti i casi sono stati partoriti neonati vivi. Speriamo che lo studio sui felini apra la strada alla clonazione del ghepardo, di cui restano circa 12 000 esemplari in Africa australe. Il lungo corteggiamento del ghepardo si svolge su un territorio molto vasto, il che spiega la rarità della sua riproduzione in cattività.

Panda-monium

Uno dei più interessanti candidati alla clonazione di specie in pericolo è il panda gigante, già sottoposto a esperimenti di riproduzione assistita, ma non di trasferimento interspecifico. Seguendo le effusioni della sfortunata coppia Ling-Ling e Hsing-Hsing, lo zoo di San Diego ha usato l'inseminazione artificiale tra Bai Yun e Shi Shi, che in agosto 1999 hanno dato alla luce Hua Mei.

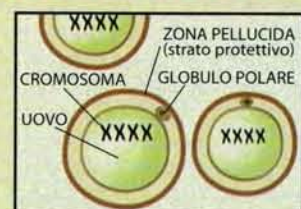
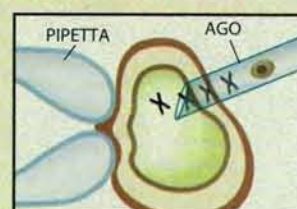
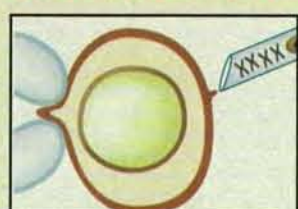
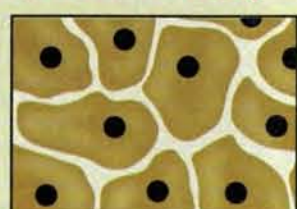
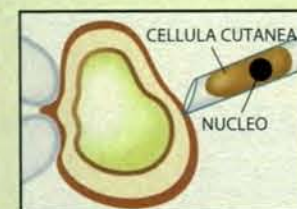
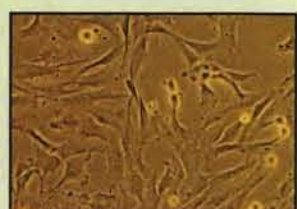
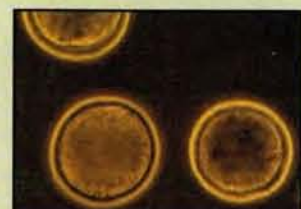
Il panda gigante è l'emblema delle specie in pericolo. Secondo un censimento di circa vent'anni fa, ne rimane meno di un migliaio di esemplari nelle foreste di bambù delle regioni montuose della Cina sudoccidentale. Alcuni biologi credono che la popolazione possa essersi ripresa in alcune zone. Il WWF porterà a termine entro la metà del 2002 un nuovo censimento.

Nel frattempo, all'ACT stiamo sviluppando progetti con il Governo della Cina per clonare il panda gigante. In realtà gli scienziati cinesi già seguono questa strada: nell'agosto del 1999 Dayuan Chen e collaboratori dell'Istituto di zoologia dell'Accademia delle scienze cinese hanno pubblicato un articolo sulla rivista «Science in China», nel quale si rende nota la fusione di cellule della muscolatura scheletrica, dell'utero e della ghiandola mammaria con uova di coniglio e la formazione di blastocisti in laboratorio.

Il coniglio, però, è un animale troppo piccolo per essere impiegato come madre surrogata per il panda gigante: un candidato migliore sarebbe l'orso nero americano. L'ACT sta ultimando i preparativi per ottenere uova di orsi neri americani uccisi durante la stagione di caccia negli Stati Uniti. Assieme agli scienziati cinesi, i ricercatori dell'ACT sperano di utilizzare queste uova e le cellule congelate dei defunti Hsing-Hsing e Ling-Ling per produrre embrioni clonati di panda gigante, da impiantare in una femmina di orso nero americano. Un gruppo di ricercatori, tra cui vari veterinari al Bear Country di Rapid City, nel South Dakota, ha già dimostrato che l'orso nero americano può partorire embrioni trapiantati. L'anno scorso la rivista «Theriogenology» riferiva della nascita di un orso nero americano da un embrione trasferito tra due orse nere gravide.

La tigre di Sumatra è sulla «lista rossa» delle specie a rischio stilata dallo IUCN. Nelle due pagine d'apertura, un ghepardo in caccia.

DigitalVision

IL PROCESSO DI TRASFERIMENTO DEL NUCLEO (CLONAZIONE)

Le uova riceventi maturano in una capsula Petri. Ognuna ha una cellula uovo vestigiale, il globulo polare.

Il globulo polare e i cromosomi vengono aspirati con un ago. Una pipetta tiene fermo il resto dell'uovo.

Una volta asportati i cromosomi e il globulo polare, all'interno della zona pellucida rimane solo il citoplasma.

Cellule epiteliali, i fibroblasti, vengono isolate per essere clonate e coltivate in capsule Petri.

Una cellula epiteliale viene a questo punto aspirata dall'ago che trapassa di nuovo la zona pellucida.

La cellula epiteliale viene iniettata all'interno della zona pellucida dove rimane separata dal citoplasma.

Lievi scosse elettriche provocano la fusione della cellula epiteliale con il citoplasma dell'uovo.

Il nucleo della cellula epiteliale con i suoi geni entra nel citoplasma dell'uovo. Dopo poche ore la cellula inizia a dividersi.

Laurie Grace (*disegni*); Philip Damiani (*microfotografie*)

Gli scienziati dell'AICRES sperano di avere successo con un bongo di cui uno di noi (Dresser) disponeva presso lo zoo di Cincinnati. Nel 1984 la Dresser e Charles Earle Pope dell'Università dell'Alabama a Birmingham (oggi con l'AICRES e la Louisiana State University) e colleghi avevano già annunciato la nascita di un bongo dopo aver estratto molto precocemente embrioni da una femmina gravida impiantandoli in una madre surrogata di antilope alcina.

Gran parte delle sottospecie montane del bongo vive in cattività e secondo la IUCN è a rischio, contando solo una cinquantina di esemplari in una piccola regione del Kenya. Secondo il censimento curato nel 1999 dal Bongo International Studbook, di questa specie esistono circa 550 esemplari negli zoo di tutto il mondo. La sottospecie di pianura sta un po' meglio: con una popolazione di qualche migliaio di esemplari sparsi nell'Africa centrale e occidentale è solo «quasi minacciata».

Alcune organizzazioni conservazionistiche degli Stati Uniti e del Kenya progettano di inviare esemplari di bongo di montagna riprodottisi in cattività in due siti del Kenya. Sempre in Kenya l'AICRES sta studiando la possibilità di trasferire embrioni congelati di bongo in madri surrogate di antilope alcina. Il ricorso alla clonazione potrebbe agevolare questi sforzi e forse consentire di ottenere un numero maggiore di bongo per la reintroduzione.

Che cosa si può fare con animali già

CHE NE È DI FIDO E FUFI?

Tra gli animali domestici clonati ci sono vacche, pecore, capre e topi da laboratorio, ma non cani e gatti, perché la clonazione di questi animali da compagnia non è poi così facile. I nostri due gruppi di ricerca hanno creato embrioni clonati di gatto, li hanno impiantati nell'utero di gatte, ma nessuna ha portato a termine la gravidanza. Per i cani i problemi sono ancora maggiori.

All'Advanced Cell Technology (ACT) abbiamo intrapreso un programma di ricerca che impiega la clonazione per riprodurre animali domestici di interesse sociale come cani per non vedenti e per non udenti o da soccorso. Insieme con la Louisiana State University, l'Audubon Institute ha collaborato con la Lazaron BioTechnologies di Baton Rouge, nella Louisiana, per clonare cani e gatti domestici.

Certamente un gran numero di persone sarebbe interessato a clonare il suo cane o il suo gatto deceduto nella speranza di avere un nuovo animale con un carattere simile al precedente. Si pensa infatti che moltissimi comportamenti di questi amici dell'uomo siano determinati geneticamente. Per quanto al mondo esistano migliaia di gatti e di cani in cerca di padrone, di fatto si utilizzano i metodi di riproduzione tradizionali per riprodurre animali dalle caratteristiche particolarmente desiderabili. La clonazione potrebbe essere un'efficace alternativa, particolarmente utile nel caso di animali utili socialmente. Oggi i cani maschi per i non vedenti, da giovani, prima dell'addestramento, vengono castrati per aumentare la loro capacità di concentrazione; in questo modo, anche se il cane diventa un ottimo accompagnatore, non può più riprodursi per procreare progenie con le stesse caratteristiche.

Animali da compagnia e socialmente utili potrebbero venire clonati. Nel film *The 6th Day*, il protagonista chiama RePet il clone del suo amato cane.

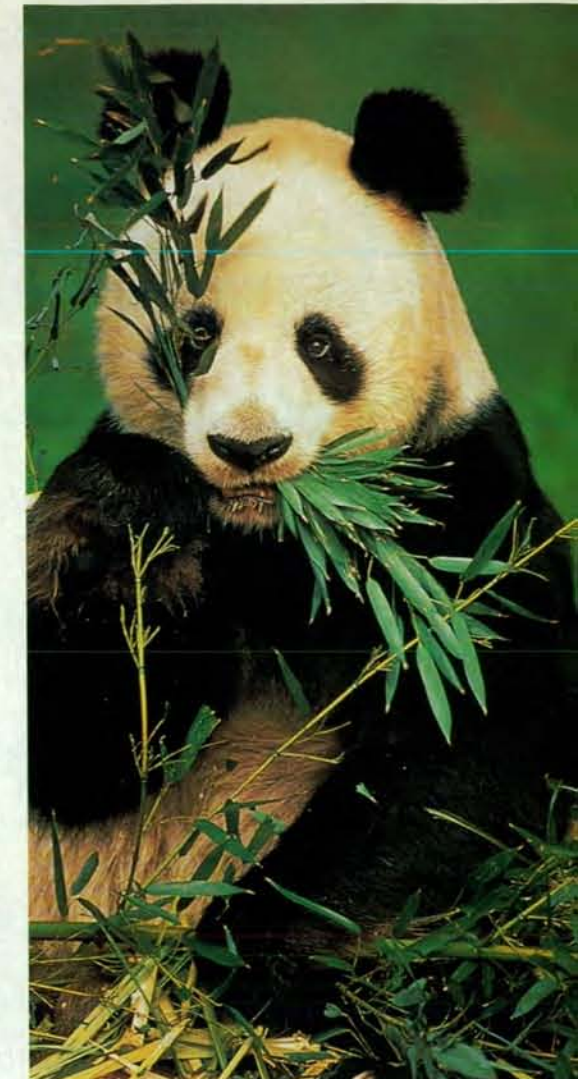
Gli sforzi per clonare animali domestici potrebbero contribuire al recupero delle specie in pericolo; così per esempio le informazioni derivate dalla clonazione di cani e gatti potrebbero tornare utili per la conservazione di canidi e felidi in pericolo.

L'ACT e altre società offrono kit per la clonazione che contengono materiali per prelevare un campione di pelle da rispedire al laboratorio; qui i ricercatori lo utilizzeranno per creare cellule capaci di dividersi, che costituiranno le cellule donatrici.

L'ACT estrae le uova per la clonazione da tratti riproduttivi prelevati da animali castrati da veterinari. Si estraggono le ovaie e con delicatezza si forano i follicoli per far uscire le uova che vengono raccolte in un mezzo di maturazione contenente ormoni, proteine e nutrienti. A piena maturità le uova sono pronte per la tecnica di trasferimento del nucleo.

Finora la nostra attenzione si è concentrata sul gatto domestico, soprattutto perché è ben nota la sua fisiologia riproduttiva e il trasferimento di embrioni in stadi precoci e tardivi ha sempre portato alla nascita di piccoli vivi. Sia l'ACT sia l'Audubon Institute sono riusciti a far maturare le uova di gatto in laboratorio e a produrre un gran numero di embrioni clonati da trasferire a riceventi.

Per i cani la faccenda è diversa, perché la loro fisiologia riproduttiva è alquanto diversa da quella degli altri mammiferi. Il cane ovula un uovo immaturo che impiega moltissimo tempo a maturare e quindi è necessario disporre di una strategia di maturazione diversa da quella utilizzata per il gatto. Alla fine si ottiene un numero di uova inferiore. Nella clonazione Fufi batte Fido.

Klein/Hobert, BIOS Peter Arnold, Inc. (*in alto*); Rob McEwan, Phoenix Pictures (*in basso*)

estinti? Le probabilità che entro breve tempo si riesca a clonare i dinosauri o il mammut sono quasi nulle. I tessuti freschi, e quindi anche il DNA, sono infatti ben scarsi. L'anno scorso è stato portato alla luce un mammut; si sperava che fosse ben conservato, ma l'alternanza di gelo e disgelo nel corso degli eoni ha provocato discontinuità strutturali nel DNA e i biologi molecolari non hanno ancora trovato il modo di colmare tali «lacune».

In Australia si sono incontrate difficoltà simili nel tentativo di clonare il tilacino, un marsupiale estintosi negli anni trenta. Ricercatori dell'Australian Museum di Sydney stanno cercando di clonare le cellule di un cucciolo di tilacino conservato in alcool nel 1866, ma il suo DNA è in condizioni così disastrose che si dovranno ricostruire tutti i cromosomi.

Il bucardo, estintosi più di recente, può fornire materiale più promettente. L'ACT sta prendendo accordi con Alberto Fernandez-Arias e José Folch del Servizio per la ricerca agricola di Saragozza, in Spagna. Fernandez-Arias ha congelato i tessuti dell'ultimo bucardo e con Folch ha tentato per molti anni di conservare questa capra che è stata decimata dalla caccia di frodo, dalla distruzione degli habitat e dalle frane. L'anno scorso hanno trasferito gli embrioni da una sottospecie di capra prossima al bucardo a una capra domestica, che ha partorito piccoli vivi.

Anche se il trasferimento interspecifico del nucleo ha avuto successo, la tecnica produce però solo femmine perché i tessuti di partenza provengono da un solo animale di sesso femminile. L'ACT sta cercando il modo di creare un maschio asportando un cromosoma X da una cellula di bucardo femmina e aggiungendo, grazie a una piccola cellula artificiale, il microsoma, un cromosoma Y proveniente da una specie strettamente imparentata. Questa tecnica è già stata impiegata da altri ricercatori per manipolare i cromosomi dell'uomo, ma non è stata ancora usata per la clonazione. Un'organizzazione no profit (Soma Foundation) sta raccogliendo fondi a questo scopo.

Perché clonare?

La clonazione di specie in pericolo è controversa, ma noi riteniamo che rappresenti una grande opportunità. Secondo alcuni la clonazione ridurrebbe ancor più la diversità genetica di queste specie. Ma non è così. Auspichiamo che venga istituita una rete mondiale di banche per la conservazione dei tessuti di tutti gli individui di ogni specie in pericolo, da cui prelevare campioni. Queste cellule - come si fa già per spermatozoi e uova - servirebbero per ricostruire il genoma di intere popolazioni di una data specie. L'impresa non sarebbe dispendiosa: con pochi dollari di elettricità all'anno un comune congelatore lungo un metro potrebbe contenere più di 2000 campioni. Oggi solo l'AICRES e il Centro per la riproduzione delle specie in pericolo dello zoo di San Diego possiedono banche di cellule congelate, utili per la clonazione.

Altri oppositori sostengono che questa tecnica potrebbe vanificare gli sforzi per la conservazione dell'habitat. Ma se è vero che la conservazione dell'habitat è la chiave della conservazione delle specie, purtroppo alcuni paesi sono troppo poveri e troppo instabili per reggere gli sforzi di una conservazione sostenibile. Quel che è peggio, la crescita continua della specie umana impedirà di salvare gli habitat di altre specie. Il trasferimento interspecifico del nucleo offre la possibilità di mantenere il pool genico di quelle specie senza doverle tenere in cattività, soluzione molto costosa nel caso di grandi animali.

Vi è infine chi teme che questa tecnica sottragga fondi ai progetti di salvaguardia dell'habitat. Ma non tutti sono d'accordo sul limitarsi a questa sola strategia e ritengono che il recupero delle specie a rischio debba puntare sulla clonazione o su altre tecniche di riproduzione assistita. È ora di muoversi.

I candidati alla clonazione (*da sinistra in alto in senso orario*): bongo, gaur, panda gigante, bucardo, ocelot.

ROBERT P. LANZA, BETSY L. DRESSER e PHILIP DAMIANI condividono l'interesse per la biologia riproduttiva degli animali. Lanza è vicepresidente della Divisione sviluppo scientifico e medico della Advanced Cell Technology con sede a Worcester, nel Massachusetts. È anche fra i fondatori della South Meadow Pond and Wildlife Association di Worcester County ed è membro della Commissione per la conservazione della Clinton Township. Dresser è vicepresidente senior del Dipartimento per la ricerca dell'Audubon Institute e direttore del Audubon Institute Center for Research of Endangered Species e del Freeport-McMoRan Audubon Species Survival Center, tutti con sede a New Orleans. Damiani, che è ricercatore alla Advanced Cell Technology, è altresì membro del Comitato sulla crioconservazione della International Embryo Transfer Society.

CORLEY-SMITH GRAHAM E. e BRANDHORST BRUCE P., *Preservation of Endangered Species and Populations: A Role for Genome Banking, Somatic Cell Cloning, and Androgenesis?* in «Molecular Reproduction and Development», 53, n. 3, pp. 363-367, luglio 1999.

MYERS NORMAN, MITTERMEIER RUSSELL A., MITTERMEIER CRISTINA G., DA FONSECA GUSTAVO A. B. e KENT JENNIFER, *Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities* in «Nature», 403, n. 6772, pp. 853-858, 24 febbraio 2000.

WILSON E. O., *Vanishing before Our Eyes* in «Time» (servizio speciale sulla Giornata della Terra del 2000), pp. 29-34; aprile-maggio 2000.

Informazioni sulle specie a rischio di estinzione sono reperibili presso il sito dello IUCN: http://www.iucn.org

Charles V. Angelo, Photo Researchers, Inc. (*bongo*); Roland Seitre, Peter Arnold, Inc. (*gaur*); Frans Lanting, Minden Pictures (*panda gigante*); John Cancalosi, Peter Arnold, Inc. (*bucardo*); Martin Wendler, Peter Arnold, Inc. (*ocelot*)

Una *banca* che fa credito alle *donne*

Un modesto esperimento avviato in Bangladesh si è rivelato un potente strumento per combattere la povertà

di Muhammad Yunus

Gli incontri della Banca Grameen che si tengono settimanalmente nei villaggi terminano con la recita collettiva degli impegni per una vita migliore e con un saluto. Nei centri di raccolta i membri dei gruppi avanzano richieste, ricevono o rimborsano prestiti e raccontano a che punto è l'attività economica che hanno avviato. Questa banca rivoluzionaria, nata in Bangladesh, vanta attualmente 39 000 di questi centri e 2,4 milioni di clienti, in grandissima maggioranza donne. Benché chi riceve prestiti sia troppo indigente per offrire garanzie, la percentuale di rimborso varia dal 96 al 100 per cento.

Karen Kasmauski *Matrix*

Ormai da anni, Amena Begum si era rassegnata a una povertà disperata e alle violenze fisiche. La sua famiglia era fra le più povere del Bangladesh, una delle migliaia che non possiedono nulla e sopravvivono occupando terreni abbandonati e lavorando alla giornata.

All'inizio del 1993, Amena convinse suo marito a trasferirsi nel villaggio di Kholshi, 112 chilometri a ovest di Dhaka. La vicinanza di un suo parente le faceva sperare che si riducessero le percosse inflittele dal marito. Ma le violenze continuarono, almeno finché non si decise ad aderire alla Banca Grameen. Una vicina, Oloka Ghosh, le aveva detto che la Grameen formava un nuovo gruppo a Kholshi e l'aveva incoraggiata a farne parte. Amena pensava che nessuno l'avrebbe voluta, ma la vicina aveva insistito: «Siamo tutti poveri, o almeno lo eravamo prima di entrare nel gruppo. Io ti sosterrò, perché so che sei in grado di avere successo».

Amena aderì alla Banca Grameen nell'aprile del 1993. Quando Amena ricevette il suo primo prestito, di 60 dollari, lo utilizzò per mettere in piedi un allevamento di polli e di

anatre. Al momento della restituzione, mentre si apprestava a chiedere un altro prestito di 110 dollari, la sua amica Oloka le diede un consiglio: «Avverti tuo marito che la Banca Grameen non concede prestiti a chi subisce violenze da parte del coniuge». Da quel giorno, le violenze su Amena diminuirono nettamente. Oggi, il suo commercio è in costante crescita e le permette di mantenere la famiglia.

Diversamente da quanto avvenuto ad Amena, in Asia, Africa e America Latina popoli interi hanno poche occasioni per sfuggire alla povertà. Secondo la Banca Mondiale, più di 1,3 miliardi di persone vivono con meno di un dollaro al giorno. Eppure la Dichiarazione universale dei diritti dell'uomo afferma: «Tutte le persone hanno diritto a un livello di vita che assicuri la salute e il benessere a loro e alle loro famiglie, in particolare per quanto riguarda l'alimentazione, l'abbigliamento, l'abitazione, le cure mediche e i servizi sociali indispensabili. Hanno inoltre diritto all'assistenza in caso di disoccupazione, malattia, inabilità, vedovanza, vecchiaia o altre difficoltà in circostanze fuori del loro controllo». Cinquant'anni sono trascorsi da questa dichiarazione e la povertà non è stata ancora sradicata. Sarà così anche tra 50 anni? Non necessariamente, stando alla mia esperienza.

Nel 1972, dopo la laurea in economia alla Vanderbilt University, tornai in Bangladesh per insegnare economia all'Università di Chittagong. Ero entusiasta delle possibilità che si aprivano per il mio paese da poco indipendente, ma una terribile carestia ci colpì nel 1974. Di fronte alla morte e alla fame, iniziai a nutrire forti dubbi sulle teorie economiche che insegnavo. Ero colpito dal baratro che separava la vita degli affamati dal mondo astratto delle teorie economiche.

Come capire l'ambiente economico reale dei poveri? Dato che l'Università di Chittagong si trova in una zona rurale, era facile visitare le famiglie indigenti del vicino villaggio di Jobra. Nel corso di numerose visite, imparai tutto sulla vita dei miei vicini, in lotta per la vita, e molto su questioni economiche che non vengono mai insegnate. Mi colpiva il fatto che le sofferenze dei poveri di Jobra nascevano dall'impossibilità di ottenere piccoli capitali con cui avviare un'attività. Spesso avevano bisogno di meno di un dollaro a testa, ma non potevano raggiungere quella somma se non a condizioni molto sfavorevoli. Non di rado dovevano vendere i propri beni a strozzini che fissavano i prezzi a loro piacimento.

La tragedia quotidiana mi spinse all'azione. Con l'aiuto dei miei studenti, feci un elenco di tutti quelli che avevano bisogno di piccole somme di denaro. Arrivammo a 42 nomi, a cui servivano in tutto 27 dollari. Ero esterrefatto. In classe parlavamo come se nulla fosse di milioni di dollari, ma ignoravamo le modestissime esigenze finanziarie di 42 persone della porta accanto, competenti e abituate a un duro lavoro. Prestai loro di tasca mia i 27 dollari necessari.

E tutti gli altri che avrebbero tratto beneficio dalla possibilità di accedere a un prestito? Decisi di rivolgermi alla banca dell'università per persuaderli a prestare denaro ai poveri della zona. Il direttore della filiale, però, diede una risposta negativa, sostenendo che gli abitanti del villaggio non erano in grado di restituire il debito. Non riuscii a convincerlo, e lo stesso avvenne con i suoi superiori che incontrai successivamente. Infine, mi offrii come garante dei prestiti.

Nel 1976, presi un prestito presso la banca locale e distribuii il denaro ai poveri di Jobra. Tutti, senza eccezioni, mi rimborsarono. Nonostante questo, la banca continuò a rifiutare la concessione diretta di prestiti. Tentai allora l'esperimento in un altro villaggio ed ebbi lo stesso successo. Per convincere i banchieri a concedere prestiti ai poveri, passai da due a cinque villaggi, a 20, a 50, a 100. In ogni villaggio, i debiti venivano assolti, ma i banchieri continuavano a negare prestiti a chi non potesse dare garanzie.

Fotografie di Salahuddin Azizee Grameen Bank; Lisa Burnett (grafico)

I prestiti ricevuti dalla Banca Grameen (*a*) sono utilizzati per svariate, piccole attività economiche come allevare galline (*b*) e costruire i vasi di terracotta per conservare l'acqua da bere (*c*). I proventi di queste attività hanno effetti significativi sul benessere della famiglia (*d*). Prima di aderire alla Banca, l'83 per cento dei membri era moderatamente povero e il 33 per cento estremamente povero, ma in seguito un quinto di loro è riuscito a emanciparsi dalla povertà.

Dato che non riuscivo a cambiare le banche, decisi di creare una banca apposta per i poveri. Dopo un intenso lavoro e numerosi incontri con il Governo, nel 1983 nacque la Banca Grameen («banca di villaggio» in bengali). Si fondava su princìpi che andavano contro ogni tradizionale regola bancaria: andavamo in cerca dei clienti più poveri, e facevamo prestiti senza garanzia. La Banca conta sulla forza dei suoi clienti, che si devono impegnare a formare gruppi spontanei di cinque persone, pronte a sostenersi e aiutarsi a vicenda. Il gruppo ha anche il compito di discutere la validità economica di un progetto e di garantire il rimborso dei prestiti. Se un membro non riesce a restituire un prestito, tutti gli altri rischiano di vedere sospeso o ridotto il loro credito.

La forza del gruppo

In genere, un nuovo gruppo avanza una proposta di prestito per due dei suoi membri, ciascuno dei quali richiede tra i 25 e i 100 dollari. Dopo la restituzione delle prime cinque rate settimanali, altri due membri del gruppo diventano a loro volta candidati a un prestito. Dopo che hanno rimborsato cinque rate, anche l'ultimo membro può chiedere un prestito. Dopo il rimborso di 50 rate, il cliente paga un interesse leggermente superiore al tasso abitualmente praticato: ma a quel punto può accedere a un prestito più consistente.

La Banca non aspetta i clienti: va essa stessa verso il popolo. I pagamenti delle rate avvengono durante incontri settimanali di sei-otto gruppi, incontri che si tengono nei villaggi in cui i membri vivono. Lo staff della Grameen assiste a questi incontri e spesso va a far visita ai clienti per vedere a che punto sono i loro progetti, sia che si tratti di allevare capre o di coltivare ortaggi o di vendere utensili.

Oggi la Banca Grameen opera in circa 39 000 villaggi del Bangladesh e ha più o meno 2,4 milioni di clienti, per il 94 per cento donne. Nel marzo del 1995, 18 anni dopo il debutto a Jobra, ha raggiunto il primo miliardo di dollari in prestiti. Sono poi bastati due anni per arrivare a quota 2 miliardi. Dopo 20 anni di lavoro, la dimensione media dei prestiti effettuati dalla Grameen è ora di 180 dollari e la percentuale dei rimborsi si colloca tra il 96 e il 100 per cento.

Un anno dopo aver aderito alla Banca, un cliente può acquistare delle compartecipazioni nella Grameen. Oggi, il 94 per cento della Banca è di proprietà della sua stessa clientela. Dei 13 membri del Consiglio d'amministrazione, nove sono eletti tra i clienti; gli altri quattro possono essere rappresentanti del Governo, docenti universitari, io stesso e altri.

Uno studio condotto da Sydney R. Schuler della John Snow, Inc., un gruppo di ricerca privato, e dai suoi colleghi ha concluso che un prestito ricevuto dalla Grameen rafforza la posizione di una donna all'interno della famiglia e la sua sicurezza economica. Nel 1998, uno studio di Shahidur R. Khandker, un economista della Banca Mondiale, ha rilevato che la partecipazione alla Grameen ha un effetto positivo anche sulla scolarizzazione e l'alimentazione dei bambini quando sono le donne e non gli uomini a ricevere il prestito. (La tendenza era chiara dall'inizio ed è una delle ragioni per cui la Grameen concede prestiti soprattutto alle donne: troppo spesso gli uomini spendono il denaro per sé.) In particolare, un aumento del 10 per cento nei prestiti alle donne dava come risultato indiretto un incremento del 6 per cento nella circonferenza del braccio delle ragazze, una misura comunemente usata per valutare la situazione nutrizionale. E per ogni 10 per cento di aumento nell'accesso al prestito da parte di una cliente, si aveva un incremento del 20 per cento circa nella probabilità che una figlia fosse iscritta a scuola.

Non tutti i benefici derivano direttamente dal credito. Aderendo alla Grameen, si assumono 16 impegni. Alcuni so-

Salahuddin Azizee Grameen Bank

Salahuddin Azizee Grameen Bank

Karen Kasmauski Matrix

Salahuddin Azizee Grameen Bank

no di semplice buon senso - bere acqua pulita, coltivare e mangiare verdura, scavare e utilizzare latrine eccetera - altri riguardano i costumi sociali, come respingere la pratica della dote e controllare le nascite. Di solito le donne recitano l'intero elenco durante gli incontri settimanali del gruppo, e questo è l'unico modo attraverso cui la Banca cura la loro applicazione. Pur in assenza di metodi costrittivi, lo studio di Schuler ha dimostrato che l'adesione alla Grameen porta a una maggior pratica della contraccezione da parte delle donne. Curiosamente, lo stesso avviene per le donne che, pur non appartenendo alla Grameen, vivono in villaggi dove opera la Banca. La natalità in Bangladesh è molto diminuita negli ultimi vent'anni, ed è possibile che l'accelerazione della tendenza sia dovuta all'influenza della Grameen.

Ogni anno, un 5 per cento di clienti della Grameen - che rappresentano 125 000 famiglie - riesce a superare la soglia della povertà. Khandker concludeva che tra questi clienti la povertà estrema (definita dal consumo di meno dell'80 per cento del minimo di cibo richiesto dalla FAO) diminuiva di oltre il 70 per cento nei cinque anni seguenti all'adesione.

Certo, non è facile mettere in piedi un efficace programma di microcrediti in grado di conseguire gli obiettivi sociali che ci proponiamo e nel contempo reggersi economicamente. Noi vogliamo che la Banca serva ai più poveri: solo chi vive con meno della metà della soglia di povertà ha accesso al credito. Mescolare i poveri con chi sta meglio porterebbe questi ultimi a dominare i gruppi. È però difficile arrivare a quanti vivono in condizioni di povertà estrema, soggetti all'emarginazione da parte dei loro pari al momento della formazione dei gruppi. Inoltre, nonostante i nostri sforzi, a volte il denaro prestato a una donna finisce nelle mani del marito.

In ragione delle sue dimensioni e della sua diffusione, la Banca Grameen ha dovuto elaborare opportuni sistemi per controllare l'efficienza dei dirigenti locali e garantirne l'onestà e la trasparenza. Un dirigente non può rimanere a lungo nello stesso villaggio, per evitare che allacci relazioni privilegiate che finiscano per nuocere al lavoro. Inoltre, non può operare in zone vicine alla sua residenza. Queste limitazioni, assieme al requisito della laurea, fanno sì che tra i dirigenti ci siano poche donne. Ne consegue l'accusa di paternalismo nei confronti della Grameen, un'accusa che ci trova sensibili e che ci spinge a cercare il modo di reclutare più donne.

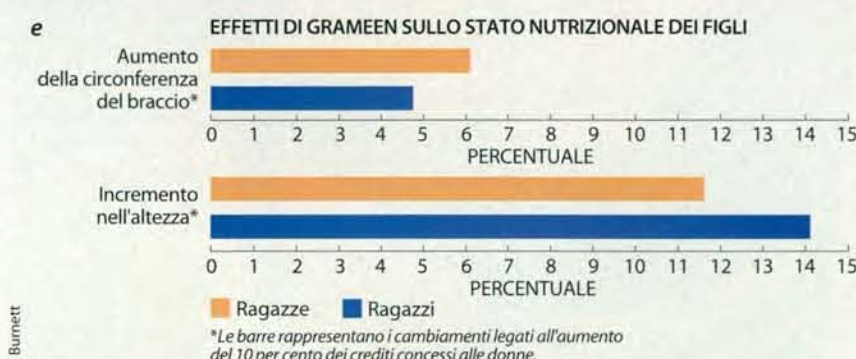
Un'altra critica diffusa nei confronti della Grameen è che non sia un'organizzazione caritatevole, ma un istituto che produce profitti. In realtà, io sono convinto che sia proprio questo il fondamento della sua validità. Nel 1998 una disastrosa alluvione ha distrutto case, bestiame e gran parte delle altre proprietà di centinaia di migliaia di clienti della Grameen. Noi non abbiamo cancellato i debiti, anche se abbiamo concesso altri prestiti e dato più tempo per i rimborsi. Se lo avessimo fatto, sarebbe crollata la nostra credibilità, un elemento centrale per il successo della Banca.

Un modello da diffondere

Il modello Grameen si è diffuso in 40 paesi. In Malaysia è arrivato nel 1986 e oggi garantisce prestiti a 40 000 famiglie povere, con una percentuale di rimborsi che si è attestata stabilmente intorno al 100 per cento. In Bolivia, il microcredito ha consentito alle donne di passare dal sistema del «cibo contro lavoro» all'avvio di proprie imprese economiche. Nel giro di due anni, la maggioranza delle donne del programma acquisisce affidabilità e competenze finanziarie sufficienti per ottenere prestiti da banche tradizionali. Successi analoghi si registrano in tutti i paesi poveri. Tutte le banche nate da questi progetti si rivolgono alle persone più povere, concedono prestiti a gruppi e privilegiano le donne.

La Banca Grameen del Bangladesh è economicamente autosufficiente dal 1995. Gli istituti analoghi negli altri paesi si avviano lentamente allo stesso risultato. Alcuni piccoli programmi di questo tipo sono stati avviati anche negli Stati Uniti, per esempio a Chicago. Purtroppo, in questo caso le operazioni sono più costose perché il costo del lavoro è molto più alto che nei paesi in via di sviluppo, dove la forte disoccupazione intellettuale rende più facile trovare dirigenti o contabili. Ne consegue che negli Stati Uniti i progetti hanno dovuto essere pesantemente sovvenzionati.

In totale, circa 22 milioni di persone povere nel mondo hanno attualmente accesso al credito. Il Microcredit Summit, un'istituzione che ha sede a Washington, D.C., funziona da centro di riferimento per i vari istituti locali e organizza congressi annuali. Nel 1998, i partecipanti hanno preso l'impegno di arrivare entro il 2005 a sostenere con il credito 100 milioni di famiglie povere del mondo, privilegiando le donne. Questa campagna è affidata ora a più di 2000 organizzazioni, da banche a istituzioni religiose a organizzazioni non governative ad agenzie delle Nazioni Unite.

Lo scenario tradizionale dello sviluppo economico nei paesi poveri prevede l'industrializzazione attraverso gli investimenti. In questa concezione «dall'alto», creare opportunità per il lavoro è l'unico modo per porre fine alla povertà. Ma in gran parte del mondo in via di sviluppo, l'aumento dell'occupazione accelera la migrazione dalle campagne alle città e crea impieghi sottopagati in condizioni miserevoli. Sono convinto che lo sradicamento della povertà abbia invece inizio quando la gente è in grado di agire sul proprio destino. Non è creando posti di lavoro che si salveranno i poveri, ma fornendo loro la possibilità di sfruttare il proprio potenziale. Più e più volte ho constatato che i poveri sono poveri non perché pigri, privi di formazione o illetterati, ma perché non possono tenere per sé il frutto del proprio lavoro.

Lisa Burnett

La condizione della donna migliora allorché ha accesso a un capitale. Il reddito di una donna - che venga dall'intreccio di cesti (*a*), dalla conduzione di un negozio (*b*), dalla produzione in casa di tessuti (*c*) o dalla fornitura di servizi telefonici ai vicini (*d*) - rinforza il suo status all'interno della famiglia, le dà maggiore controllo sulla propria fertilità e le consente di prendersi meglio cura dei figli (*e*). Le donne sono anche più coscienziose nel rimborso dei prestiti. Per tutte queste ragioni, i programmi di microcredito si rivolgono in primo luogo alle donne.

Creare il proprio lavoro è forse l'unica soluzione per queste persone, a cui le nostre economie rifiutano il credito e che i nostri contribuenti non sostengono. Il microcredito vede in ogni persona un potenziale imprenditore e accende i piccoli motori economici di una parte della società emarginata e respinta. Quando un gran numero di questi motori è in funzione, si può avere un vero mutamento socioeconomico.

Applicando questa filosofia, la Grameen ha consentito la nascita di più di una decina di aziende, spesso in collaborazione con altri imprenditori. Aiutando clienti e microrisparmiatori ad assumere la proprietà di più ampie imprese, cerchiamo di accelerare il processo di superamento della povertà. Per esempio, la Grameen Phone è una compagnia di telefonia mobile volta a servire le zone urbane e quelle rurali del Bangladesh. Dopo uno studio pilota in 65 villaggi, ha acceso un prestito per estendere l'attività in tutti i villaggi in cui la Banca opera. Circa 50 000 donne, molte delle quali non hanno mai visto un telefono o addirittura la luce elettrica, diventeranno fornitrici di servizi telefonici nei loro villaggi. Infine, diventeranno proprietarie della Compagnia, acquistandone quote. Ultima novità, la Grameen Investments, che consente a singoli cittadini degli Stati Uniti di sostenere compagnie come la Grameen Phone ricevendo anche interessi.

Ritengo che sia responsabilità di ogni società civile assicurare la dignità umana a tutti e consentire a ognuno di mettere in luce la propria creatività. La povertà non è creata dai poveri, ma dalle istituzioni e dalle pratiche politiche. Non è restando legati a vecchie concezioni che possiamo risolvere il problema, ma mettendone in campo di radicalmente nuove.

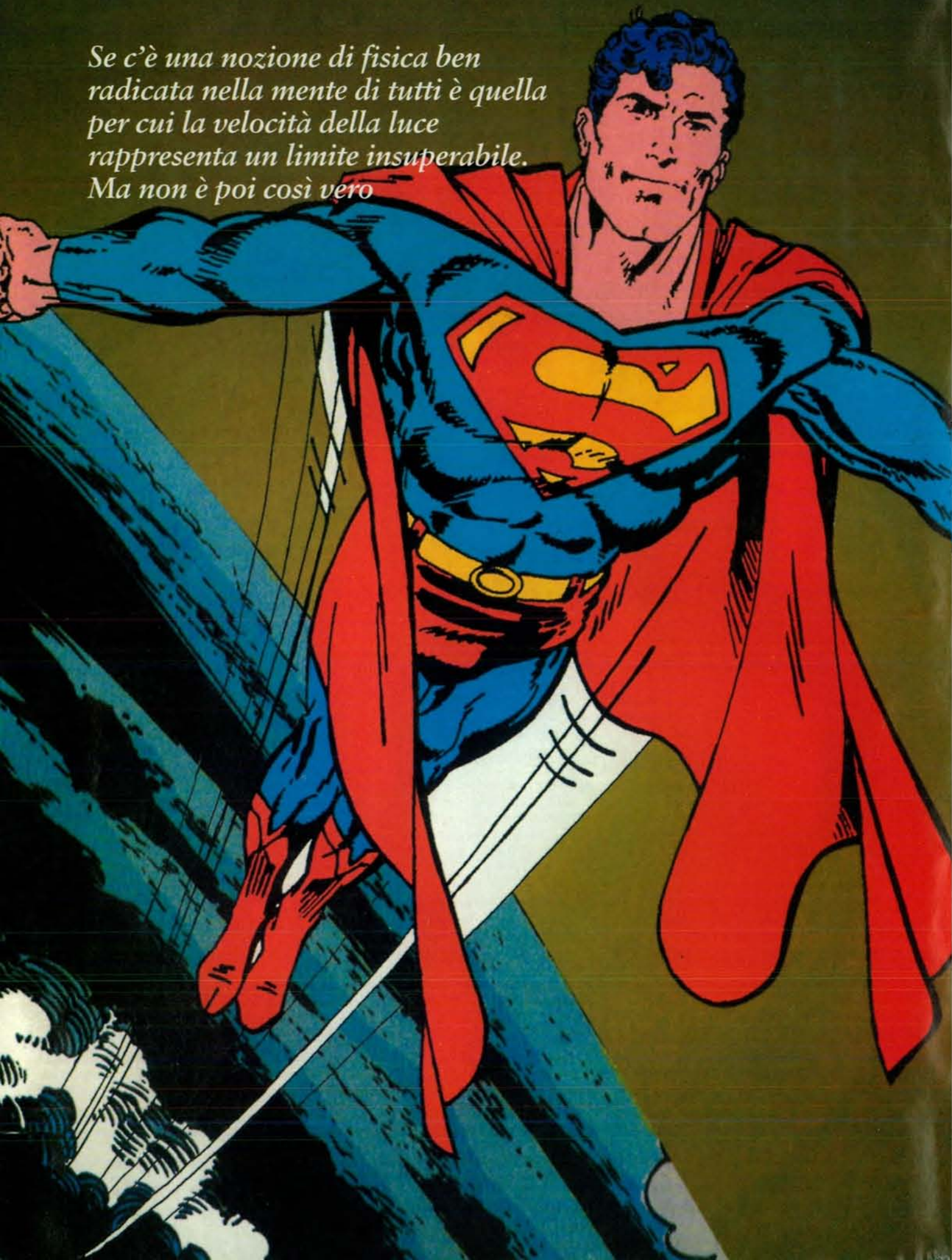
MUHAMMAD YUNUS, fondatore e direttore generale della Grameen Bank, è nato in Bangladesh. Nel 1970, subito dopo la laurea in economia alla Vanderbilt University, è tornato in patria per insegnare alla Chittagong University. Nel 1976 ha dato il via al progetto Grameen, al quale oggi si dedica a tempo pieno. Ha fatto parte di vari comitati delle Nazioni Unite e del Governo del Bangladesh per i problemi della povertà, della salute e delle donne. Per questa attività ha ricevuto molti riconoscimenti nazionali e internazionali.

KHANDKER SHAHIDUR R., KHALILY BAQUI E KHAN ZAHED, *Grameen Bank: Performance and Sustainability*, World Bank Discussion Papers, n. 306, World Bank, 1995.

COUNTS ALEX, *Give Us Credit*, Times Books (Random House), 1996.

KHANDKER SHAHIDUR R., *Fighting Poverty with Microcredit: Experience in Bangladesh*, Oxford University Press, 1998.

Sito della Grameen Bank: www.grameenfoundation.org

Se c'è una nozione di fisica ben radicata nella mente di tutti è quella per cui la velocità della luce rappresenta un limite insuperabile. Ma non è poi così vero

Più veloce della luce?

di Daniela Mugnai

Coloro che hanno messo fine ai loro interessi scientifici con l'esame di maturità possono aver dimenticato il principio di gravitazione universale, il secondo principio della dinamica o la legge di Gauss, ma pochi hanno dimenticato che la velocità della luce, quella che si designa convenzionalmente con la lettera *c*, è un limite invalicabile.

Sarà perché è sempre sembrato piuttosto strano che una quantità sommata a se stessa dia come risultato la stessa quantità e non il suo doppio, sarà perché la teoria che porta a questa conclusione è dovuta a un piccolo uomo che, sotto l'aspetto trasandato e i capelli incolti, nascondeva una delle menti più brillanti che il XX secolo abbia generato, ma - qualunque sia la ragione - nella mente di tutti noi è ben impresso questo concetto: nulla può superare la velocità della luce. Non solo, ma ammettere il suo superamento porta, come inevitabile conclusione, a quelli che in fisica si chiamano «paradossi», che sono stati, e sono tuttora, alla base della moderna fantascienza. Così, le macchine del tempo e i viaggi interstellari, con relativo rallentamento dei processi di invecchiamento, sono entrati nell'immaginario collettivo e il binomio «superamento della velocità della luce-sconvolgimento delle leggi note» si è impresso nella mente di molti.

E forse è per questo motivo che la notizia di recenti misure, relative alla propagazione in aria di onde elettromagnetiche, nelle quali si evidenziava un comportamento «superluminale» (termine che serve a descrivere processi in cui si ha il superamento della velocità della luce), ha valicato il confine dei laboratori per invadere i mezzi di comunicazione.

Le bizze delle onde

Pur obbedendo alle stesse leggi, le onde elettromagnetiche differiscono le une dalle altre a seconda della loro frequenza e, sebbene sia difficile spiegare semplicemente che cosa siano e come funzionino, non è troppo complicato descriverne l'impiego.

Tutti noi ci serviamo quotidianamente di onde elettromagnetiche: sfruttiamo le radio-onde (onde elettromagnetiche a bassa frequenza) per inviare comunicazioni radiotelevisive, mentre onde di frequenza superiore servono per i telefoni cellulari, e le micro-onde sono ormai note a tutti per il loro utilizzo nei moderni forni. Poiché la luce visibile è costituita da onde elettromagnetiche di una determinata frequenza, spesso - con una terminologia un po' approssimativa anche se non sbagliata - si usa questo termine per indicare più in generale le onde elettromagnetiche. Infatti, se quest'ultima espressione può essere sconosciuta e apparire «difficile», tutti sanno che cosa sia la luce.

La propagazione delle onde elettromagnetiche è stata studiata fin dalla fine dell'Ottocento come mezzo per le comunicazioni a lunga distanza. Da allora sono stati compiuti progressi eccezionali, e se adesso è possibile comunicare con qualsiasi parte del globo lo si deve a coloro che indicarono la strada e a tutti quelli che poi hanno proseguito il cammino. Ebbene, nessuno dubita che queste onde abbiano nel vuoto una velocità uguale a *c*, mentre in mezzi diversi dal vuoto tale

Alessandro Saragosa

Anedio Ranfagni, Rocco Ruggeri (sullo sfondo) e Daniela Mugnai davanti all'apparato sperimentale per generare fasci di Bessel più veloci della luce.

velocità può essere ancora uguale a c (come nell'aria) o minore. Tuttavia, proprio perché l'utilizzo delle onde è nato per comunicazioni a grande distanza, è stato piuttosto trascurato lo studio del campo vicino, cioè di quella zona dello spazio vicina all'antenna trasmettitrice dove possono esistere particolari tipi di onde che, per le loro caratteristiche, cessano poi di esistere.

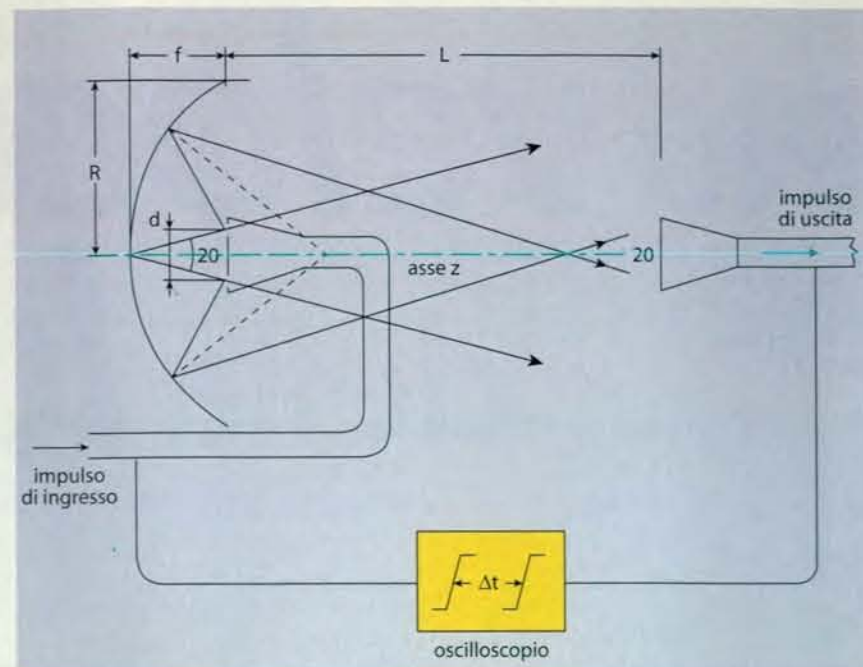
Un esperimento delicato

Nell'esperimento condotto a Firenze - all'Istituto di ricerca sulle onde elettromagnetiche «Nello Carrara» del Consiglio nazionale delle ricerche - si è indagata proprio questa zona, considerando un particolare insieme di onde noto come fascio di Bessel.

Vediamo di che cosa si tratta. Un fascio di Bessel può essere creato mediante un anello circolare posto sul piano focale di un sistema convergente che può essere costituito da una lente o da uno specchio: ciascun punto dell'anello si comporta idealmente come una sorgente puntiforme che il sistema convergente trasforma in un'onda piana inclinata di un certo angolo rispetto all'asse di propagazione. Il campo elettrico creato dall'interferenza di tutte le onde piane uscenti dalla sorgente origina il fascio di Bessel.

Mentre le singole onde che compongono il fascio si propagano ciascuna in una direzione inclinata di un certo angolo θ rispetto all'asse di propagazione, con velocità c, l'intero fascio si propaga lungo il proprio asse di simmetria con velocità $c/\cos\theta$. Il fascio di Bessel - che è una soluzione reale dell'equazione delle onde - è caratterizzato, come tutte le onde elettromagnetiche, da un'ampiezza, che descrive quanto è «grosso» il fascio, e da una fase, che contiene tutte le informazioni relative alla direzione e alla velocità di propagazione. È la direzione di propagazione della fase a coincidere proprio con l'asse z, con velocità pari appunto a $c/\cos\theta$. Questa espressione, che è superiore a c quando l'angolo θ non è nullo, rappresenta la velocità di propagazione della fase e, in assenza di dispersione, essa è anche uguale alla velocità di gruppo.

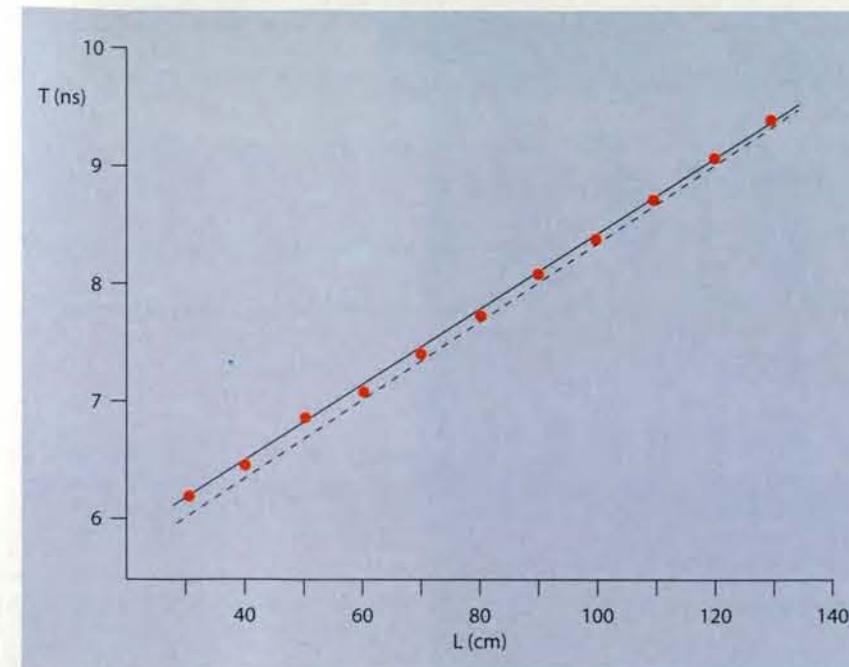
Nelle misure eseguite con l'apparato sperimentale schematizzato in questa pagina sono stati utilizzati due diversi anelli con diametro medio di 7 e 10 centimetri, a cui corrispondono angoli di circa 16 e 23 gradi rispettivamente. La frequenza dell'onda portante, di 8,6 gigahertz (corrispondente a una lunghezza d'onda di circa 3,5 centimetri) è modulata da impulsi rettangolari separati tra loro da intervalli temporali del-

È qui rappresentato uno schema semplificato dell'apparato sperimentale usato per la generazione del fascio di Bessel e per la misura del suo tempo di propagazione nell'aria che, come il vuoto, è un mezzo non dispersivo. L'anello circolare, solidale con un'antenna a tromba (trasmettitore) connessa a un generatore di microonde attraverso una guida d'onda, si trova sul piano focale di uno specchio sferico che rappresenta il sistema convergente il cui diametro $2R$ è pari a 50 centimetri ed è caratterizzato da una distanza focale di 12 centimetri. Il ricevitore è costituito da una seconda antenna a tromba posta sull'asse z a una distanza L variabile rispetto al piano focale.

l'ordine dei microsecondi. L'impulso, prelevato prima dell'emettitore e dopo il ricevitore, viene analizzato da un oscilloscopio che misura il ritardo t valutato, convenzionalmente, a metà altezza del fronte di salita. Poiché la modulazione della portante origina treni d'onda, i ritardi misurati sono, per definizione, ritardi di gruppo. L'assenza di dispersione consente di eseguire misure piuttosto accurate poiché, in queste condizioni, il pacchetto d'onda non si deforma durante la propagazione.

Nel grafico della pagina a fronte si possono vedere i risultati delle misure eseguite utilizzando un anello di diametro medio pari a 7 centimetri, che dà origine a un angolo di 16 gradi. Nell'esperimento che abbiamo descritto, il ritardo relativo alla distanza di un metro è pari a 3,155 nanosecondi, più breve rispetto a quello di 3,333 nanosecondi che si sarebbe ottenuto per una velocità di propagazione uguale a quella della luce: la velocità del fascio di Bessel è superiore a c del 5 per cento. Per ottenere un effetto ancora più pronunciato, sono state eseguite anche misure con un angolo di 23 gradi: in questo caso, la velocità è circa il 25 per cento maggiore di quella della luce.

Il senso di un risultato

Per comprendere i risultati apparentemente sconcertanti dell'esperimento è bene ricordare che le onde elettromagnetiche sono caratterizzate da tre diverse velocità: la velocità di fase, che descrive la velocità con cui la fase si sposta secondo una ben definita direzione di propagazione; la velocità di gruppo, che è la velocità di propagazione di un treno d'onde, e può differenziarsi dalla prima soprattutto a causa del mezzo in cui tale propagazione avviene; e infine la velocità del segnale, che è la più importante, poiché da essa dipende il trasporto dell'informazione. Le prime due, quella di fase e quella di gruppo, possono essere superiori a c, mentre la velocità del segnale, secondo la definizione corrente, ha come limite invalicabile la velocità della luce.

Tipicamente, si definisce segnale un impulso che abbia un'estensione temporale finita, ovvero un treno d'onde, o pacchetto d'onde, e che sia anche un evento unico. Così, nell'esperimento descritto, la modulazione di una portante origina un pacchetto d'onde e la velocità a esso legata è senza dubbio una velocità di gruppo, ma la misura si

I punti rappresentano i ritardi misurati in funzione di L, e la linea continua è la migliore approssimazione della linea che li congiunge, dalla cui pendenza si ricava la velocità di gruppo del pacchetto. La linea tratteggiata rappresenta il tempo impiegato a percorrere L alla velocità della luce. All'aumentare di L, la velocità tende a coincidere con c, poiché i fasci di Bessel esistono solo per una certa distanza. Oltre questa distanza essi sono comuni onde elettromagnetiche con velocità pari a c. L'estensione del campo è proporzionale a cosθ e la velocità al suo inverso: perciò, aumentando θ aumenta la velocità, ma diminuisce la profondità del campo, riducendo l'estensione in cui l'effetto si produce.

è svolta utilizzando un treno continuo di impulsi - dato che è estremamente difficile eseguire una misura su un singolo impulso - e pertanto, a rigore, non si può parlare di velocità del segnale.

Viene perciò da chiedersi perché l'esperimento abbia destato tanto clamore, anche presso la comunità dei fisici. I motivi principali sono due. Il primo è che la grande semplicità dell'esperimento non lascia spazio a fantasiose speculazioni e a modelli teorici *ad hoc* come avveniva, per esempio, negli esperimenti di *tunneling*, dove la dispersione è sempre presente. Nel nostro caso, le leggi che governano la propagazione sono quelle ben note.

Il secondo motivo si basa sulle seguenti considerazioni: se supponiamo di avere impulsi sempre più rarefatti, in modo che siano tanto lontani l'uno dall'altro da poterli considerare eventi singoli, può la misura subire dei cambiamenti rispetto a quella già fatta? E ancora: trattandosi di propagazione in aria, l'esperimento si è svolto in assenza di dispersione - o, quantomeno, in condizioni di dispersione trascurabile - e in questa situazione, per le onde elettromagnetiche, le tre velocità coincidono. Si può estendere questa conclusione anche ai fasci di Bessel? È possibile sostenere che, poiché il pacchetto non si deforma, come avverrebbe se il mezzo fosse dispersivo, l'energia si propaga nella stessa direzione e con la stessa velocità della fase? Se così fosse, allora anche la velocità del segnale sarebbe superiore a c, poiché il trasporto dell'informazione può avvenire solo attraverso il trasporto dell'energia.

Speculazioni teoriche di questo tipo sembrerebbero non escludere la possibilità che anche la velocità del segnale possa superare la velocità della luce nel vuoto, che la teoria della relatività pone come limite insuperabile. Occorre tuttavia grande cautela da questo punto di vista poiché si tratta, appunto, di speculazioni. Per chiarire il problema, perciò, sono necessarie ulteriori indagini, sia teoriche sia sperimentali. Ma se risultasse che anche la velocità del segnale è superiore a c, che cosa succederebbe? Ci troveremmo davvero a vivere il paradosso dei telegrafisti, secondo il quale un segnale può essere ricevuto prima ancora di essere emesso? E che fine farebbe il principio di causalità, che stabilisce la relazione temporale tra causa ed effetto? È necessario fare chiarezza.

I paradossi legati alla teoria della relatività sono rigorosi, ma esistono solo all'interno di una teoria che ammette c come limite invalicabile. Qualora fosse possibile il superamento di questo limite, in casi particolari o in particolari condizioni, questi stessi paradossi cesserebbero di esistere e quello che succederebbe sarebbe semplicemente quello che tutti noi sappiamo, quello che ci hanno insegnato Galileo e Newton: e cioè che un sistema che si muove più velocemente di un altro arriva prima rispetto a quello più lento. Pertanto, se il superamento della velocità della luce fosse dimostrato anche nella velocità del segnale sarebbe una scoperta interessante, ma certo non un annullamento delle leggi fisiche preesistenti. La teoria che descrive la propagazione delle onde elettromagnetiche è - e rimarrà - una teoria esatta.

Così come la meccanica quantistica e quella relativistica non sono in contrasto con la meccanica classica, nuove scoperte porteranno sempre a un allargamento della conoscenza e a un suo arricchimento, mai a un annullamento. La storia della scienza deve continuare e progredire, ma poggiando sulle solide fondamenta poste da tutti coloro che prima di noi hanno affrontato il cammino della ricerca. Lasciamo pertanto che la fantascienza, con le sue macchine del tempo, rimanga al suo posto, nell'immenso e affascinante universo della fantasia. Nell'universo della scienza il posto del tempo è quel luogo dove il passato è noto e immutabile, e il futuro resterà sconosciuto fino al momento in cui non lo vivremo.

DANIELA MUGNAI si è laureata in fisica nel 1979 all'Università di Firenze, e svolge la sua attività di ricerca presso l'Istituto di ricerca sulle onde elettromagnetiche «Nello Carrara» del CNR, dove è responsabile scientifico del progetto «Processi non radiativi in fisica dello stato solido». Dal 1997 al 2000 è stata responsabile del gruppo di ricerca fiorentino del progetto speciale «Simulation of Tunneling Processes» nell'ambito del quale si è svolta la ricerca presentata in questo articolo.

MUGNAI D., RANFAGNI A. e RUGGERI R., *Observation of Superluminal Behaviors in Wave Propagation* in «Physical Review Letters», 84, p. 4830, maggio 2000.

Che aria tira fra quattro mura

La sensazione di trovarsi a proprio agio in un certo ambiente dipende da numerosi fattori, non ultimo l'odore percepito: un ricambio d'aria insufficiente può rendere invivibile un locale affollato

di Maurizio Palmisano

Durante una normale giornata di lavoro, quanto tempo trascorriamo all'aperto? Per la maggior parte degli abitanti dei paesi industrializzati la risposta è una-due ore: il tempo richiesto dal tragitto casa-lavoro - sempre che non venga fatto chiusi in automobile o in un mezzo pubblico - o poco più; persino il tempo libero viene molto spesso trascorso in ambienti chiusi. Eppure, mentre per l'inquinamento degli ambienti esterni si sono messi a punto accurati metodi di valutazione e parametri di riferimento, sono assai meno conosciuti e pubblicizzati i metodi per valutare la qualità dell'aria negli ambienti interni.

Tale qualità dipende principalmente dalla concentrazione degli inquinanti, ovvero dalla quantità di inquinanti rilasciata nell'aria in rapporto al fattore di diluizione determinato dal ricambio con aria pulita. Alcuni inquinanti però non sono immediatamente percepibili dai nostri sensi. È questo il caso del gas radioattivo radon che, essendo incolore e inodore, può essere misurato solo utilizzando strumenti di analisi. La maggioranza delle molecole inquinanti è tuttavia percepibile non solo tramite l'odorato, ma anche per l'azione irritante o tossica svolta sull'organismo. Per esempio, l'ozono e la formaldeide possiedono un odore pungente caratteristico e in più sono fortemente irritanti per le mucose. L'anidride carbonica è del tutto inodore, ma a concentrazioni crescenti provoca sensazioni via via più intense d'aria viziata e soffocante: vale come esempio la sensazione sgradevole che si prova ogni qualvolta si sale su un mezzo di trasporto pubblico nelle ore di punta.

Ma anche gli inquinanti rilasciati da arredi, suppellettili, rivestimenti e dall'ambiente in generale possono contribuire ad aumentare la sensazione di disagio. In condizioni normali, è impossibile discriminare l'azione dei singoli inquinanti; ciò che percepiamo è solo un livello più o meno elevato di accettabilità, che possiamo tradurre in una sensazione di «comfort» respiratorio più o meno elevato.

Unità di misura per l'aria viziata

Le sensazioni provocate dagli inquinanti variano da persona a persona, il che rende soggettivo e difficile da quantificare il livello di accettabilità dell'aria ambientale. Per di più, allo stato attuale, non è ancora disponibile un sensore in grado di valutare la qualità dell'aria come farebbe un naso umano, anche se i risultati ottenuti dai primi esperimenti condotti da ricercatori del CNR promettono bene. Tuttavia, studi molto approfonditi hanno permesso di stabilire una serie di regole che consentono di utilizzare la sensazione soggettiva di comfort per quantificare il livello di qualità dell'aria negli ambienti interni. In particolare un gruppo di lavoro, diretto dal danese Ole Fanger, si è occupato della percezione sensoriale della qualità dell'aria, introducendo due nuove unità di misura: l'olf e il decipol.

Gli esseri umani possono valutare la qualità dell'aria attraverso due vie principali: la prima è costituita dal senso dell'olfatto, che consente di percepire migliaia di molecole differenti attraverso i recettori presenti nella cavità nasale; la seconda consiste nei recettori sensoriali situati sulle mucose delle prime vie respiratorie e dell'occhio, estremamente sensibili all'azione irritante di molte sostanze. La combinazione delle sensazioni raccolte attraverso queste due vie produce le sensazioni di aria piacevole e leggera, oppure stantia e soffocante.

Esistono anche altri meccanismi di reazione che possono influenzare la sensazione complessiva, come per esempio gli effetti tossici degli inquinanti inalati: infatti elevate concentrazioni di anidride carbonica provocano sensazioni di soffocamento e affanno, mentre modeste quantità di monossido di carbonio sono sufficienti a indurre stordimento e cefalee, con ovvie conseguenze sulla valutazione del livello qualitativo dell'aria.

Esiste una precisa relazione tra il livello qualitativo percepito in decipol e la percentuale di persone insoddisfatte. Nel grafico in alto a pagina 63 è mostrata una curva che indica le percentuali di insoddisfatti in un ambiente inquinato da 1 olf al variare del ricambio d'aria da 5 a 40 litri al secondo per persona standard. La correlazione proviene dai risultati di una ricerca in cui 168 «annusatori» hanno giudicato l'aria diversamente inquinata dai bioeffluenti emanati da più di un migliaio di uomini e donne sedentari a riposo.

Anche il biossido di carbonio può essere adoperato come indicatore della concentrazione dei bioeffluenti. La curva rappresentata nel grafico in basso sempre a pagina 63 illustra la correlazione tra la concentrazione di anidride carbonica e la percentuale di insoddisfatti.

Il carico inquinante

Le fonti di inquinamento negli edifici comprendono gli stessi occupanti e le loro attività, per esempio il fumo

DigitalVision

del tabacco. Inoltre, i materiali da costruzione e di rivestimento, nonché lo stesso impianto di trattamento dell'aria, possono contribuire sensibilmente all'inquinamento dell'edificio. Ma anche l'aria esterna di ricambio può contribuire al carico inquinante totale che grava sull'ambiente. Questo carico può essere distinto in una parte analizzabile chimicamente, espressa come emissione dei singoli contaminanti da parte delle fonti, e in una parte percepibile, espressa tramite gli olf.

L'apporto di inquinanti di una determinata fonte può essere quantificato in grammi al secondo o in grammi per metro quadro al secondo per ogni singola sostanza emessa. La somma delle quantità emesse dall'insieme delle fonti, relativamente a quella singola sostanza, costituisce il carico inquinante specifico totale. Sfortunatamente, le molecole coinvolte possono essere centinaia o migliaia e non sempre sono disponibili dati precisi di riferimento in letteratura. La tabella nella pagina a fronte riporta come esempio i carichi inquinanti specifici emessi nell'ambiente da occupanti fumatori e non fumatori, relativamente al monossido e al biossido di carbonio.

Greg Bartley/ICP

Tipologia degli occupanti	Inquinamento olf*	CO_2 l/s*	CO (da fumo) l/h*	Vapor acqueo g/h*
Con attività sedentaria				
• Fumatori 0%	1	19		50
• Fumatori 20%	2	19	11×10^{-3}	50
• Fumatori 40%	3	19	21×10^{-3}	50
• Fumatori 100%	6	19	53×10^{-3}	50
Con esercizio fisico				
• Basso livello	4	50		200
• Medio livello	10	100		430
• Alto livello	20	170		750
Bambini				
• Asilo 3-6 anni	1,2	18		90
• Scuola 14-16 anni	1,3	19		50

* Valori per persona

Cambiare aria, un'impresa non facile

La possibilità di ricambio dell'aria dipende fortemente dall'accettabilità dell'aria esterna.

Qualora la qualità dell'aria immessa non sia più che accettabile, si dovrebbero impiegare filtri adeguatamente dimensionati, avendo cura di posizionare la presa esterna in modo da minimizzare la concentrazione degli inquinanti esterni.

Un fattore che, negli edifici di recente costruzione, ha contribuito a peggiorare ulteriormente la qualità dell'aria interna è stato l'impiego di serramenti a chiusura ermetica aventi lo scopo di far risparmiare sui consumi energetici. In realtà, l'eccessiva impermeabilità all'aria degli edifici non solo ha eliminato la ventilazione naturale, ma ha creato nuovi disagi e pericoli. Ne sono conferma la frequente comparsa di muffe nelle abitazioni e lo strepitoso successo di apparecchi come deumidificatori, umidificatori, depuratori, ozonizzatori, ionizzatori che, con un sempre maggior consumo di energia, promettono di trasformare l'aria interna viziata in una sana aria di «montagna» (senza peraltro eliminare tutti gli agenti inquinanti); un metodo più casalingo per *non* rinnovare l'aria consiste nel «cancellare» i cattivi odori stagnanti negli ambienti con i «soffi di aria fresca» dei vari deodoranti.

La cattiva qualità dell'aria interna crea non pochi problemi anche negli edifici che sono totalmente condizionati e privi di ventilazione naturale: oltre a produrre una climatizzazione spesso squilibrata (aria troppo secca o troppo umida, ambienti surriscaldati o, al contrario, troppo raffreddati), gli stessi impianti di ventilazione possono trasformarsi - qualora siano mal progettati o mal gestiti - in pericolose fonti di inquinamento. Questo accade soprattutto quando i sistemi di umidificazione, i filtri e le canalizzazioni non vengono puliti con suffi-

Un ufficio pieno d'insidie

L'ufficio è sempre stato considerato un luogo di lavoro sicuro, specie se paragonato agli ambienti industriali. L'aumento dei soggetti esposti e il modificarsi delle tecnologie costruttive di ambienti, arredi e strumenti di lavoro hanno però fatto aumentare le segnalazioni dei disagi anche in questo tipo di ambiente, che si manifestano come «sindrome dell'edificio malato» o Sick Building Syndrome. Consideriamo alcuni tra i fattori responsabili.

Gli **impianti di climatizzazione** dovrebbero controllare le condizioni termiche e di umidità dell'aria, di ricambio controllato e di cattura per filtrazione delle polveri. Spesso però diventano fonte di rumore, contaminanti microbiologici, polveri e gas. I microrganismi che possono proliferare in vari punti degli impianti sono causa di epidemie o casi isolati di legionellosi e di alveoliti allergiche da actinomiceti termofili. Pare che la «febbre del lunedì», caratterizzata da una sintomatologia para-influenzale, sia dovuta a una ipersensibilità scatenata dalla diffusione, con la riaccensione degli impianti, di microrganismi proliferati nel fine settimana.

La Sick Building Syndrome si manifesta con disturbi a livello oculare e delle prime vie aeree, irritazioni e secchezza della pelle, intontimento, cefalea e alterazioni olfattive e del gusto. È più frequente negli uffici situati in edifici moderni con aria condizionata.

I **materiali coibentanti**. Sia l'amianto sia i corrispondenti materiali sintetici hanno trovato vasto impiego in edilizia, specie come isolanti e come materiale di supporto per altri manufatti sintetici. L'applicazione più diffusa è stata l'uso di amianto spruzzato come materiale di finitura antifiamma e antiriflesso acustico. La liberazione di fibre di amianto nell'ambiente indoor può aumentare il rischio di cancro del polmone e di mesotelioma pleurico.

Le **fotocopiatrici**. Basate sull'azione della luce ultravioletta, sviluppano modeste quantità di ozono. Anche il riscaldamento delle resine termoplastiche, che formano il 95 per cento del toner e dei lubrificanti del rullo di pressione, genera sostanze nocive. L'ozono può provenire anche dalle apparecchiature elettriche che utilizzano alti voltaggi e dai filtri elettrostatici dell'aria. Anche a concentrazioni relativamente basse può causare alterazioni polmonari acute irreversibili a breve termine; poiché aumenta la reattività bronchiale all'istamina, danneggia in particolare gli asmatici.

L'**illuminazione**. La luce è costituita da radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa tra 380 e 780 nanometri (nm). La luce è bianca quando contiene tutte le lunghezze d'onda che compongono lo spettro e assume varie tonalità e colori quando alcune di esse prevalgono rispetto alle altre. La sensibilità massima dell'occhio umano si situa intorno a 500-550 nm e può variare, anche se di poco, in rapporto all'intensità della radiazione.

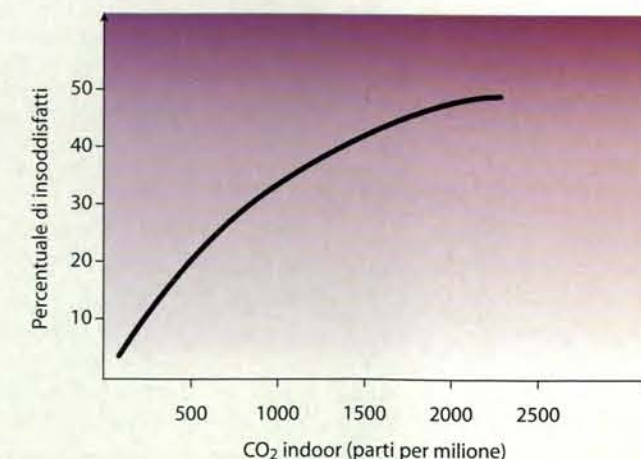
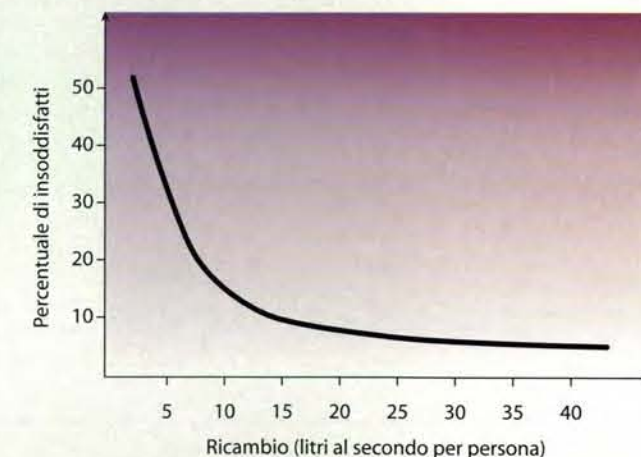
Un'illuminazione sbagliata è un fattore di notevole disagio fisico e psicologico, in grado di determinare disturbi nell'accettazione e nella qualità del lavoro, ma non induce alterazioni della vista.

L'**arredamento**. I mobili in truciolato contengono resine in grado di rilasciare quantità apprezzabili di formaldeide, un composto organico in fase di vapore. L'irritazione delle mucose da formaldeide si manifesta a concentrazioni tra 0,1 e 0,2 parti per milione. Soggetti ipersuscettibili o immunologicamente sensibilizzati alla formaldeide possono avere reazioni anche a concentrazioni inferiori. La formaldeide è anche probabilmente uno dei maggiori responsabili della Sick Building Syndrome.

Alcuni **inquinanti chimici** originano quasi esclusivamente all'interno degli ambienti stessi; altri penetrano con l'aria esterna, specie nelle giornate di elevato inquinamento.

I **gas di combustione** (NO_2, SO_2, CO) possono provenire dall'esterno, ma anche dal fumo. NO_2 e SO_2 sono soprattutto dannosi per le vie respiratorie, mentre il CO ha un ampio spettro di effetti (astenia, cefalea, obnubilazione sensoriale, perdita di coscienza, morte). Sembra che un'esposizione protratta a bassi livelli di CO possa danneggiare l'apparato cardiocircolatorio.

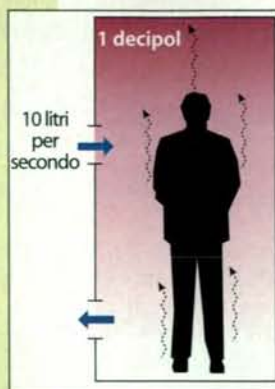
Il **fumo di tabacco** contiene oltre 200 composti, alcuni dei quali sicuramente tossici e irritanti per i tessuti biologici. Esso è causa o concausa, per i soggetti passivamente esposti, di malattie cardiovascolari, respiratorie e di cancro polmonare.

I **composti organici volatili** (idrocarburi alifatici, aromatici e clorurati, aldeidi, terpeni, alcoli ecc.) sono generati da processi di combustione, fumo di sigaretta, fotocopiatrici, stampanti laser, arredi (mobili, moquette), materiali di pulizia e, talora, ambiente esterno. Gli effetti vanno dall'irritazione delle prime vie aeree e degli occhi fino ad alterazioni genotossiche cancerogene per soggetti che trascorrano molto tempo in ambienti confinati.

Piccolo glossario

Bioeffluenti:
Tutte le molecole rilasciate nell'aria dell'ambiente da parte dell'organismo: si tratta per lo più di anidride carbonica e sostanze organiche volatili.

Decipol:
Unità di misura messa a punto per quantificare la concentrazione degli odori percepiti dagli esseri umani. Il decipol è in realtà un sottomultiplo del «pol» e corrisponde alla qualità dell'aria percepita in un ambiente nel quale sia presente un carico inquinante di un olf con un ricambio d'aria esterna pari a 10 litri/secondo.

Olf
Unità di misura relativa in grado di valutare una sorgente inquinante confrontandola con una sorgente di riferimento. Un olf è l'indice dei bioeffluenti emessi da una persona standard, dove per persona standard si considera un adulto medio, sedentario a riposo, termicamente in una situazione neutra. Anche gli inquinanti emessi da arredi, suppellettili e rivestimenti possono essere misurati in olf confrontandoli con la stessa sensazione di cattiva qualità dell'aria rilasciata da una o più persone standard.

La cucina è sicuramente un locale in cui si possono generare molti inquinanti indoor: per questo è essenziale disporre di una cappa aspirante sempre in buone condizioni di efficienza.

Maurizio Palmisano

ciente frequenza e diventano ricettacolo di sporcizia, polvere e colonie di batteri potenzialmente patogeni.

L'inquinamento indoor fino a pochi anni fa era oggetto solamente di relazioni scientifiche e convegni. Successivamente sono state varate le Direttive CEE in materia di ventilazione degli edifici, che definiscono i criteri di costruzione di tali sistemi di ventilazione, diffusi e obbligatori in molti paesi europei. Questi sistemi prevedono nel periodo invernale un ricambio d'aria che sfrutta l'effetto del vento (tiraggio naturale) e/o le differenze di temperatura esistenti tra esterno e interno (tiraggio termico).

Grazie a queste recenti norme si vanno precisando le nuove esigenze qualitative dell'abitare: minimo consumo di energia e massima garanzia di igiene e comfort ambientale. La ventilazione controllata è uno strumento utile, indispensabile e oggi obbligatorio per garantire salute, sicurezza e comfort negli ambienti di vita e in quelli di lavoro; e si spera che le future legislazioni sul contenimento dei danni da fumo di tabacco possano essere l'occasione anche per dare norme definitive a questo importante problema della vita quotidiana.

MAURIZIO PALMISANO lavora all'Istituto di medicina sperimentale del CNR presso l'Area di ricerca di Tor Vergata, Roma. Laureato in geologia e scienze naturali e laureando in scienze ambientali, si è sempre occupato della salvaguardia dell'ambiente e in particolare dei problemi relativi allo smaltimento dei rifiuti, all'inquinamento elettromagnetico, al radon e all'amianto. Ha partecipato alla realizzazione della nuova Carta geochimica d'Italia con la mappatura della distribuzione di elementi tossici e nocivi, derivanti da inquinamento naturale e antropico, in un'area di oltre 400 chilometri quadrati dell'Alto Lazio.

BRIGANTI A., *Filtrazione e disinquinamento dell'aria*, Tecniche Nuove, Milano, 1990

European Concerted Action «Indoor Air Quality and its Impact on Man», Report n.11, *Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings*, EUR 14449 EN, Office for Publications of the European Communities, Luxembourg, 1992.

GREES L., PEJTERSEN J. e VOLBJORN O., *Perceptions and Symptoms as a Function of Indoor Environmental Factors, Personal Factors and Buildings Characteristics in Office Buildings*, in S.Yoshizawa e altri (a cura), *Indoor Air '96*, vol. 4, 1996.

WINKLER S. L. e CHOCK D. P., *Air Quality Predictions of the Urban Airshed Model Containing Improved Advection and Chemistry Algorithms*, in «Atmospheric Environment», 30, pp. 1163-1175, 1996.

FANGER P. O., *Hidden Olfs in Sick Buildings*, in «ASHRAE Journal», 30, pp. 40-43, 1998.

Direttiva CEE Rapporto n.1 sulla qualità dell'aria interna, Organizzazione mondiale della Sanità.

DPR 246/93 (Dir. CEE 89/106).

Decreto del Ministro dei Lavori pubblici del 5/8/1994.

Come cambia il modo di divertirsi

Digital Vision

Musica, film, televisione, videogiochi e il World Wide Web si stanno trasformando in un'entità unica. Con il passaggio di questi media, finora distinti, da mezzi di produzione e di distribuzione essenzialmente analogici ad altri completamente digitali, i loro prodotti stanno convergendo in un solo grande flusso di dati digitali. Chiamiamolo intrattenimento digitale: ci raggiungerà sugli schermi televisivi, sui PC, sugli orologi da polso: ogni volta che vorremo. E il divertimento non sarà solo passivo: gli utenti stessi potranno creare e distribuire prodotti di intrattenimento.

Terry Renna AP Photo

Sony Computer Entertainment

La visione dell'intrattenimento digitale proposta dalla Sony si basa sul «cinematografo personale» Glasstron e sulle capacità grafiche della potente PlayStation2, esemplificate da questa inquadratura del videogioco *The Legend of Dragoon*.

Prevista da anni, la convergenza dei contenuti (le informazioni, la grafica, il materiale audio e video incorporati in una produzione digitale), dei canali di distribuzione come la TV via cavo e Internet, dei PC, della televisione e degli apparecchi digitali wireless, sta cominciando ad attuarsi. E mentre trasformerà il nostro tempo libero, la digitalizzazione di audio e video farà crollare anche l'ordine costituito dell'industria dell'intrattenimento. Un primo segnale sarà una riorganizzazione della tecnologia dell'intrattenimento. TV, VCR e registratori DVD potrebbero essere spazzati via da applicazioni come i nuovi «*personal video recorder*» di TiVo e Replay TV, che permettono di interrompere e rivedere uno spettacolo TV in diretta, eliminare le pubblicità, nonché cercare e memorizzare programmi relativi a un dato argomento o in cui sia presente un certo attore.

Uno dei catalizzatori potrebbero essere le piattaforme per i giochi, come la nuova PlayStation 2 di Sony, che dispone di microprocessori e di capacità grafiche competitive con quelle degli odierni PC. Sony potrebbe conquistare il mercato dell'intrattenimento digitale se riuscirà a stringere alleanze con un'azienda di distribuzione - per esempio una compagnia di TV via cavo - per completare la catena di contenuti, distribuzione e piattaforme. Già la prossima generazione di macchina per videogiochi, la PS3, offrirà la possibilità di acquisti online e altri servizi Internet interattivi.

Fine delle trasmissioni

L'azione di disturbo all'ordine costituito dell'intrattenimento costringerà l'industria al confronto in nuovi ambiti. Per esempio, le case discografiche stanno arrampicandosi sugli specchi per trovare il modo per consentire di scaricare brani online a pagamento: una possibilità è quella di offrire un solo ascolto online di un brano per una cifra irrisoria, l'ascolto illimitato di uno o più brani o l'accesso all'intero catalogo per somme crescenti.

Le cosiddette tecnologie di convergenza permetteranno di scegliere spettacoli televisivi, musica e film digitali di tutto il mondo (si veda l'articolo *Verso la convergenza* a pagina 70) accessibili attraverso Internet. Entro il 2020, un'Internet più robusta, a larga banda, potrebbe addirittura sostituire tutti i sistemi di trasmissione - radio, TV, film, carta stampata - come mezzo privilegiato di distribuzione; o almeno così prevede Martin Tobias, fondatore di Loudeye, una compagnia di Seattle che codifica e distribuisce media digitali.

Un'altra rivoluzione riguarderà l'impresa di produrre e distribuire film o spettacoli televisivi: telecamere digitali a basso costo e programmi di editing per PC permetteranno a ciascuno di realizzare un film a costi relativamente bassi e distribuirlo grazie a società come AtomFilms e IFilm che distribuiscono video sul Web (si veda l'articolo *Fare film sta cambiando* a pagina 82).

E come verrà ricomposta la disputa sulla violazione dei diritti di autore? Le difficoltà che sta incontrando l'industria discografica con siti come MP3 e Napster che permettono di scaricare musica online si presenteranno presto su scala molto maggiore con la televisione e i film digitali (si veda l'articolo *Guerre musicali* a pagina 77). Ma per quanto il pubblico (specialmente quello più giovane) si aspetti che musica e video debbano essere liberi e gratuiti per il solo fatto di essere in rete, le leggi sul copyright continuano a stabilire che artisti, autori e registi siano i titolari dei diritti delle loro creazioni e meritino di essere pagati per esse. È probabile che la creazione di una nuova normativa diventi presto ineludibile.

Un'economia dell'intrattenimento

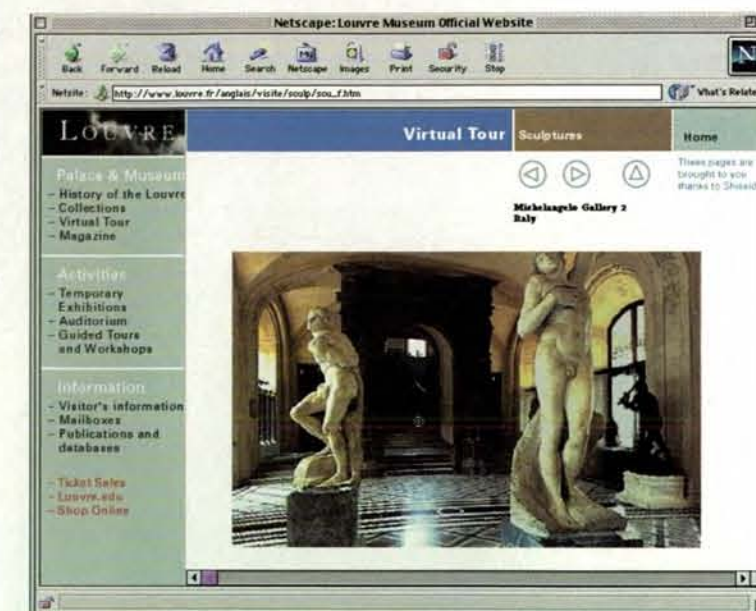
La diffusione dell'intrattenimento digitale potrebbe determinare cambiamenti anche nella società. Secondo alcuni esperti, non è escluso che l'economia statunitense finisca per focalizzarsi sull'intrattenimento. Ma nel contempo si profilano all'orizzonte problemi assai spinosi. Il nuovo programma software Freenet, scaricabile da freenet.sourceforge.net, permette a tutti i PC in rete di funzionare come nodi transitori che possono scambiarsi i file direttamente, senza dover ricorrere a un intermediario come Napster. Mentre coloro che usano Napster possono essere identificati, non c'è alcun modo per scoprire chi invia o scarica un file usando Freenet: gli utenti possono copiare file direttamente da PC a PC in totale anonimato. Le implicazioni sono di vasta portata. Le spie potrebbero inviare documenti incriminanti senza timori di rappresaglia e i dissidenti in regimi totalitari potrebbero diffondere senza rischi propaganda antigovernativa. Naturalmente, i pedofili potrebbero trasmettere le loro foto illegali e gli spacciatori di droghe potrebbero fare affari online. Sarebbe l'anarchia.

Che l'intrattenimento digitale possa influire profondamente sulla società o meno, di sicuro cambierà le abitudini dei consumatori. Come spiega Robert W. Saint John, fondatore della compagnia di produzione di d-video Nearly News Productions di San Diego, «scomparirà addirittura il concetto di tenere in mano un CD o un film». Perché spendere per acquistare una sola «cosa», nel momento in cui *tutto* sarà istantaneamente disponibile, modificabile, portatile e conveniente?

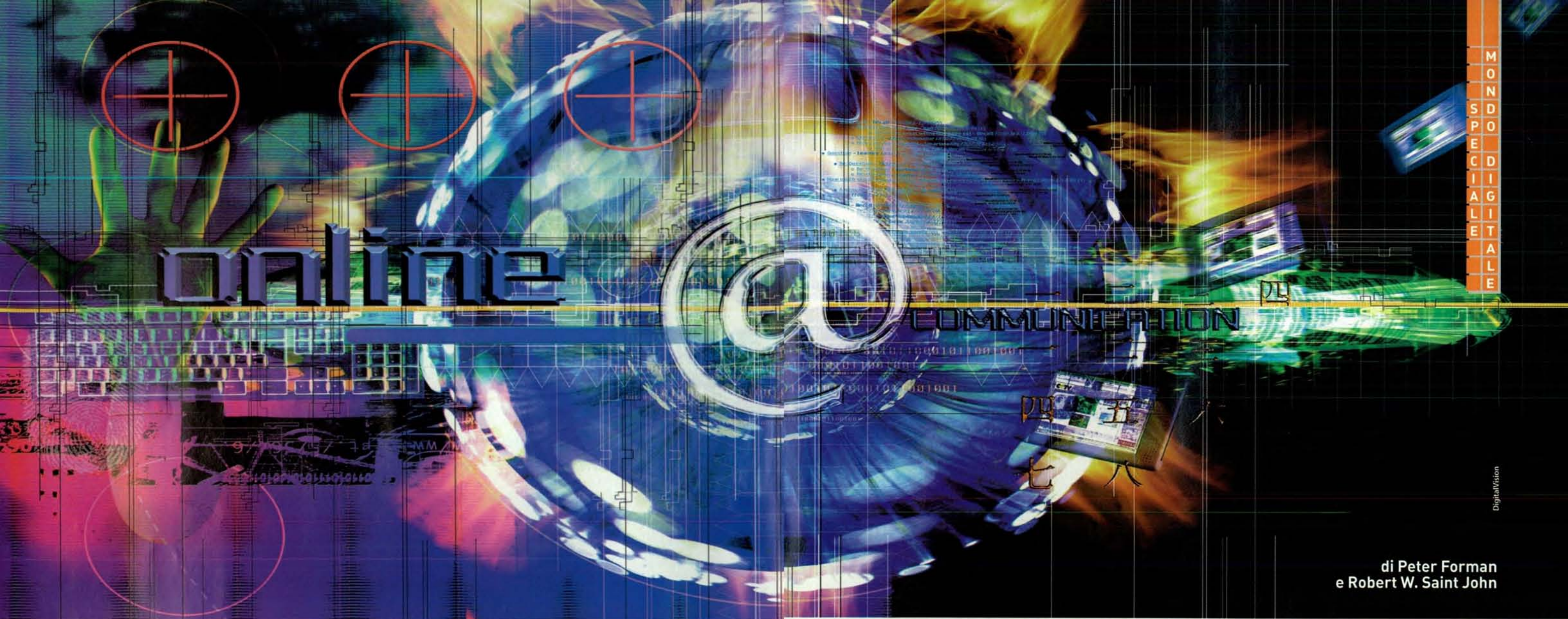
È facile essere affascinati dall'idea di un mondo in cui tutto l'intrattenimento sia digitale. Ma per quanto possano apparire realistici una visita a un museo virtuale, una passeggiata sulla Grande Muraglia o l'immagine di un mangiatore di fuoco che si esibisce in strada, si tratta di esperienze ben diverse da quelle reali, perché restiamo sempre consapevoli che con un solo comando possiamo spegnere la macchina.

Inoltre, nessun apparecchio digitale può sostituire una partita di calcio di quartiere, il carnevale nelle strade o un parco cittadino. E per quanto «interattivo» possa diventare l'intrattenimento digitale, esso continuerà a lasciarci per lo più seduti in poltrona. Certo, godiamocelo; ma poi andiamo a ballare con la persona che amiamo.

MARK FISCHETTI,
redazione di «Scientific American»

Le nuove tecnologie digitali lanciano una sfida all'ordine costituito dell'industria dell'intrattenimento.

RMN/Art Resource, New York

I navigatori Web possono effettuare visite virtuali a molti celebri musei, tra cui il Louvre di Parigi; poche istituzioni culturali rimangono fuori dalla portata della tecnologia digitale.

DigitalVision

di Peter Forman
e Robert W. Saint John

Verso la convergenza

TV, film, video su Internet e musica potrebbero confluire in un unico grande flusso di intrattenimento digitale che potremo godere su qualunque apparecchio, dovunque, in ogni momento. Il problema sta nei dettagli...

La World's Fair di New York del 1939 vide la presentazione ufficiale della televisione, ma l'apparecchio ricevente all'interno del padiglione RCA era molto in anticipo rispetto ai tempi. Era una combinazione di televisore, radio, registratore e macchina per fax che, col senno di poi, dimostra il fondamentale desiderio dell'uomo di fondere insieme tutti i media. Oggi questo obiettivo ha un nome: convergenza, ossia l'unione di comunicazioni audio, video e dati in una singola sorgente, ricevuta su un solo apparecchio, fornita da un'unica connessione.

Prevista da decenni, la convergenza sta infine realizzandosi, anche se in modo confuso. Telefoni cellulari, personal computer e televisori stanno cominciando a rubarsi funzionalità a vicenda, e le modalità con cui si stanno interconnettendo questi dispositivi indicano che la convergenza è dietro l'angolo. Quando si realizzerà, tutte le forme di intrattenimento digitale confluiranno in un unico grande flusso di bit. Sarà possibile godersi film, spettacoli TV, video Internet e musica in qualunque luogo e in qualunque momento. Basterà che i produttori e gli organismi che stabiliscono gli standard si accordino su dettagli come la distribuzione su larga banda, la protezione dei diritti d'autore e la compatibilità dei mezzi di visualizzazione. E non è cosa da poco.

La grande convergenza è costituita da tre convergenze complementari: contenuto (audio, video e dati); piattaforme (PC, TV, apparecchi per il collegamento a Internet e macchine per videogiochi); e distribuzione (il modo in cui i contenuti raggiungono la vostra piattaforma).

Il World Wide Web, con l'applicazione chiave dell'e-mail, ha notevolmente accelerato la convergenza dei contenuti per l'intrattenimento e ha fatto capire che questi devono essere adattabili, in modo da poter essere trasmessi a qualunque tipo di piattaforma, dai telefoni cellulari alla TV. Ciò

Se si escogiteranno standard di compatibilità e metodi di protezione dei dati, l'intrattenimento digitale convergerà in una singola sorgente che potrà seguire l'utente ovunque si trovi.

ha provocato ripensamenti e preoccupazioni in chi crea e controlla i contenuti stessi. Per esempio, il tentativo di fusione fra America Online (AOL), un grande provider Internet, e Time Warner, uno dei maggiori colossi dei media al mondo, ha suscitato il timore che la concorrenza possa essere soffocata. Preoccupazioni sono anche suscitate da Napster, un software che consente di scaricare direttamente tramite Internet musica in formato digitale dai computer di altri utenti, in genere senza l'autorizzazione dei detentori dei diritti (si veda l'articolo *Guerre musicali* a pagina 77).

Non sono certo risultati auspicabili, e indicano che i cambiamenti nell'intrattenimento digitale sono così inauditi da poter richiedere l'intervento del legislatore. Ciò che risulta chiaro è che i tre elementi della convergenza sono strettamente intrecciati, ma le piattaforme costituiscono il settore in cui le scelte tecnologiche sono più aperte. Il numero di standard e architetture concorrenti è enorme. Il modo in cui si svolgerà la competizione determinerà in gran parte quanto sarà completa la convergenza e quando si realizzerà.

Il sito Web *Who Wants to Be a Millionaire?* permette agli utenti di giocare in tempo reale mentre viene trasmesso il popolare quiz televisivo: un passo notevole verso i media interattivi.

ABC Inc.

Battaglia di standard

Fra i primi esempi di piattaforme convergenti vi erano rudimentali tentativi di televisione interattiva. Il più significativo fu il sistema QUBE della Warner Amex, sperimentato a Columbus, in Ohio, negli anni settanta; e in sostanza dimostrò, con spese altissime, che gli utenti non desideravano comunicare con il canale televisivo.

C'è voluta Internet per abituare la gente all'interattività. L'episodio più recente è un passo in direzione della convergenza: lo scorso maggio, ABC Television della Disney, in collaborazione con il suo «fratello» su Internet, Go.com, ha lanciato negli Stati Uniti una versione dello spettacolo di quiz *Who Wants to Be a Millionaire?* nella quale, collegandosi in Internet, i telespettatori possono giocare con il proprio PC mentre seguono lo spettacolo in TV. Nel primo mese, 3,5 milioni di visitatori si sono collegati al sito. Tuttavia si tratta ancora di un approccio «a due schermi», richiedendo una TV e un PC nella stessa stanza. Gli esperti dibattono se l'apparecchio definitivo sarà un PC/TV oppure una TV/PC; in entrambi i casi, si dovranno superare ostacoli fondamentali.

La televisione digitale sta evolvendo lungo tre filoni: una migliore risoluzione, la moltiplicazione dei canali e le funzionalità interattive. Alcuni miglioramenti vengono ora introdotti negli apparecchi televisivi, mentre altri riguardano i decodificatori che connettono la TV ai cavi dei provider televisivi. Nel 1995 il comitato internazionale ATSC (Advanced Television Systems Committee) ha approntato un insieme di standard per risolvere i problemi connessi alla televisione digitale; ma la loro adozione non avverrà nel giro di una notte. L'informazione digitale richiede la costosa sostituzione o il potenziamento di pressoché ogni componente della catena di distribuzione, quasi tutta analogica: dalla produzione alla trasmissione all'apparecchio televisivo. Negli Stati Uniti, la FCC ha imposto una scadenza a tutte le stazioni perché effettuino la trasformazione verso la TV digitale entro il 2006, e il Congresso ha fornito gratuitamente alle compagnie di trasmissione una banda aggiuntiva per effettuare le modifiche. I principali network hanno sperimentato vari tipi di trasmissione digitale dal 1998, ma la conversione è stata lenta, in parte a causa di controversie politiche: alcuni vogliono affittare la loro banda aggiuntiva a compagnie di comunicazioni wireless, ma il Congresso comprensibilmente si è opposto.

Una possibilità preoccupante è che lo standard stabilito per la modulazione della trasmissione, chiamato 8-VSB, possa non essere adatto per una ricezione adeguata tramite antenna; e molte case non sono servite da cavo o da satellite. Anche possedendo una nuova antenna digitale, non è facile ottenere la ricezione ottimale orientandola; un segnale TV digitale o è ricevuto perfettamente o non viene captato del tutto. Alcuni produttori e compagnie di trasmissione (che hanno già speso centinaia di milioni di dollari per la transizione) stanno premendo per un passaggio al presumibilmente più robusto standard europeo COFDM (*coded orthogonal frequency division multiplex*), mentre altri fanno notare che questa trasformazione, in un momento in cui trasmettitori e ricevitori digitali basati su 8-VSB sono già sul mercato, ritarderebbe la televisione digitale almeno di cinque anni. Stando così le cose, difficilmente i consumatori sostituiranno i televisori analogici con quelli digitali. La maggioranza degli esperti stima che l'intera transizione richiederà dai 10 ai 15 anni.

La convergenza di contenuto digitale, distribuzione in larga banda e piattaforme per la visualizzazione crea la «grande» convergenza dell'intrattenimento e dell'informazione digitali, mentre il feedback consente l'interattività.

Bryan Christie

Un altro problema è che fare della larghezza di banda aggiuntiva. Alcune opzioni sono quelle di dedicarla alla televisione ad alta definizione (HDTV), di fornire un maggior numero di canali televisivi a risoluzione standard (SDTV) o di permettere una risoluzione leggermente migliore per certi tipi di trasmissioni che prevedono il multicasting - trasmissione multipla - e l'interattività.

Una televisione in grado di gestire tutti questi formati sarebbe costosa. Economie di scala possono ridurre i costi, ma finché i contenuti della televisione digitale non saranno abbastanza allettanti, i consumatori rimanderanno gli acquisti. L'industria dell'intrattenimento digitale si rende conto che ciò che importa sono i contenuti; si tratta di trovare le giuste formule che spingano i consumatori verso una piattaforma digitale.

Nel campo della d-TV, i paesi più avanzati sono il Giappone, che convertirà il suo servizio analogico HDTV in digitale nel 2002 e il Regno Unito, che trasmette in SDTV su grande schermo anziché in HDTV. Purtroppo Giappone, Europa e Stati Uniti stanno ancora perseguendo standard TV diversi, così come hanno fatto per decenni.

Più difficile da realizzare è la vera televisione interattiva (ITV). Gli attuali standard americano ed europeo non la consentono ancora, anche se l'Europa sta mettendo a punto alcuni sistemi. Un passo avanti può essere quello di Open TV, una compagnia di Mountain View, in California, finanziata da grossi nomi come AOL, Time Warner e News Corp. Essa produce il software e il middleware (l'architettura tecnica) che devono essere posti tra un trasmettitore ITV e l'utente e li fornisce su licenza agli operatori delle trasmissioni via cavo. Il software è utilizzato in circa 8 milioni di decodificatori per reti via cavo di tutto il mondo, come l'inglese BSkyB e la tedesca PrimaCom AG: è basato in parte sui linguaggi standard del Web come HTML e adotterà presto il più recente linguaggio XML. I decodificatori supportano funzioni interattive come una guida elettronica ai programmi TV, e-mail, shopping online, video su richiesta e pubblicità personalizzata. Nel frattempo, l'inglese Cable & Wireless Communications e altri stanno usando la piattaforma Liberate ITV (basata su HTML e JavaScript) per fornire servizi interattivi attraverso modem via cavo, come la spesa online, nonché servizi bancari, telefono, e-mail e televisione digitale. Numerosi altri progetti di sviluppo di piattaforme per ITV sono in corso sia negli Stati Uniti sia in altre parti del mondo.

Fortunatamente non tutto nella d-TV è una potenziale torre di Babele. L'industria si è accordata, in tutto il mondo, su un metodo di compressione video che permetta di velocizzare la trasmissione e poi di decomprimerla perché appaia il più possi-

Vincere la battaglia della distribuzione

Questioni economiche, più che tecnologiche, determineranno il modo in cui l'intrattenimento digitale raggiungerà gli utenti. Ma, per prevalere, qualsiasi metodo dovrà fornire velocità di trasmissione superiori a 100 megabit al secondo (Mbps). Qui sono presentate le opzioni possibili, che dovranno essere migliorate:

Rete telefonica

È presente ovunque, ma il modem standard da 56 chilobit per secondo (kbps) non scarica abbastanza velocemente file digitali. Una connessione asimmetrica DSL (Digital Subscriber Line) sempre attiva consente velocità fino a 1,5 Mbps. Tuttavia, la DSL non può trasmettere al di là di qualche chilometro dalla centrale di commutazione, il che esclude molti utenti.

TV via cavo

Molte compagnie televisive hanno steso cavi ibridi fibra ottica/coassiale per incrementare la capacità almeno fino a 6 Mbps ma sono state distratte dalla tradizionale concorrenza con le aziende di trasmissione, le compagnie telefoniche e i provider Internet. Un'eventuale integrazione (probabilmente attraverso fusioni) di banda larga, contenuti e connessione bidirezionale renderà le grandi compagnie che operano nel settore i più formidabili distributori di intrattenimento digitale. Un ostacolo: ci vorranno almeno tre anni per sostituire i convertitori per la TV analogica con semplici decodificatori digitali.

Wireless fisso

Può consentire un accesso fino a 2 Mbps; una buona opzione per utenti che vivono in zone rurali e non accedono a cavo o DSL. La connessione viene effettuata mediante un'antenna installata sul tetto. Il wireless è il solo modo per connettere telefoni digitali PCS e computer palmari alla Rete.

Satellite

Hughes Network Systems, provider di DirecTV, offre anche DirecPC che consente di scaricare da Internet fino a velocità di 400 kbps. Tuttavia, i dati in uscita devono essere inviati via modem, generando considerevoli ritardi. Esistono alcuni veri sistemi interattivi bidirezionali, ma sono molto costosi.

Trasmissione TV

Le stazioni televisive dipendono ancora dall'ampiezza di banda limitata a 6 MHz/19,39 Mbps per canale. La compressione MPEG offre a chi trasmette la scelta di inviare un segnale TV ad alta definizione oppure quattro canali standard, oppure una combinazione di video, audio e dati. Ma per una interazione bidirezionale è necessaria una seconda connessione.

Bryan Christie

Bryan Christie

bile simile all'originale. Questa operazione è compiuta mediante un codec (compressore/decompressore) basato su sofisticati algoritmi. Il codec standard per la d-TV è MPEG-2 (così chiamato per essere stato progettato da Motion Picture Experts Group); funzionando su qualsiasi piattaforma di visualizzazione, è diventato lo standard generalizzato per televisione digitale, trasmissione via cavo digitale, trasmissione diretta via satellite e videodisco digitale (DVD).

Il codec standard della prossima generazione, MPEG-4, per molti aspetti è modellato dalla convergenza: è il passo necessario per trasmettere video digitali di alta qualità su Internet, compresi i dati che specificano elementi interattivi. Può persino trasmettere video a velocità molto basse (5 chilobit per secondo) adatti per reti wireless mobili.

Alla ricerca dell'apparecchio killer

Tutta questa tecnologia richiede apparecchiature di decodificazione e connessione più sofisticate di quelle presenti in un televisore tradizionale. Anche se alcuni ricevitori di trasmissioni digitali via satellite e via cavo sono già in commercio, non sono realmente in grado di ricevere le trasmissioni TV digitali: il televisore dell'utente deve avere un ricevitore d-TV integrato. Serve un «apparecchio killer», che segni la svolta decisiva; ed esso potrebbe emergere da una di tre attuali applicazioni televisive: il lettore DVD, la cosiddetta personal television o le macchine per videogiochi.

Negli Stati Uniti il lettore DVD è stato uno dei prodotti di maggiore successo nella storia dell'elettronica di consumo. Dopo soli due anni, oltre 4 milioni di lettori erano presenti nelle case americane, e secondo le stime dovrebbero ora superare i 10 milioni. Un DVD può immagazzinare oltre due ore di video digitale MPEG-2 a media definizione con molte tracce audio di alta qualità, informazioni per la navigazione e grafica. Alcuni hanno anche funzioni interattive: la versione DVD di *Independence Day* contiene versioni alternative di scene del film e permette di partecipare a un gioco di battaglia spaziale.

Il personal video recorder (PC fuso con il videoregistratore, detto anche personal television) è un secondo promettente apparecchio, introdotto nel corso del 2000. Si tratta di un supporto di memorizzazione per la TV realizzato da compagnie come TiVo e ReplayTV. Un sistema di trasmissione è inserito, in formato MPEG-2, nell'hard disk. Lo spettatore può rivedere spezzoni registrati mentre prosegue la registrazione della trasmissione, creando replay immediati o eliminando la pubblicità. Si possono programmare le trasmissioni preferite a tema - come «sport dal vivo» o «opera lirica» - e l'apparecchio registra le trasmissioni in «canali virtuali» che potranno essere visti più tardi. La macchina è in grado di scorrere elenchi elettronici in cerca di programmi analoghi e di registrarli automaticamente. Registrazione «intelligente», accesso a guide sofisticate ai programmi e pausa in diretta sono tre funzionalità fondamentali per il futuro intrattenimento digitale.

Il terzo precursore della futura piattaforma definitiva è la popolarissima consolle per videogiochi. L'introduzione del Dreamcast della Sega nel 1999, con il suo modem da 56K, ha permesso ai giocatori di competere l'uno contro l'altro attraverso Internet. Sony ha risposto con PlayStation 2, che dispone di drive DVD, Dolby Digital e audio DTS, e una CPU e un elaboratore grafico competitivi con quelli dei personal; inoltre fra breve tempo potrà connettersi a un modem. L'aspetto più interessante è che Sony ha di recente annunciato l'intenzione di concedere su licenza questa tecnologia, che ben presto potrebbe essere utilizzata per TV, decodificatori, PC e altre macchine per videogiochi.

Il PC per l'intrattenimento

Le nuove tecnologie televisive potrebbero però scontrarsi con gravi ostacoli. Potrebbero richiedere un'interfaccia più potente rispetto al comune telecomando, ma meno macchinosa della tastiera di un computer. Nessuna di esse permette una comoda interattività. E la concorrenza dei produttori potrebbe obbligare gli utenti ad accumulare periferiche accanto agli schermi televisivi, vanificando l'obiettivo di un apparecchio onnicomprensivo. Viste queste incertezze, la convergenza potrebbe essere portata avanti dal PC e dal Web.

Con una CPU da 1 gigahertz che si affaccia sul mercato, dischi rigidi da 40 gigabyte disponibili a basso costo, potenti elaboratori grafici per gestire la manipolazione di video e immagini, un'interattività online semplice e DVD riscrivibili dietro l'angolo, il PC è pronto ad assumere il ruolo di piattaforma per l'intrattenimento digitale.

Il dibattito su chi, PC o televisione, porterà alla convergenza fa pensare alla disputa sul rapporto rete/utente della metà degli anni novanta. Compagnie emergenti come Sun, Oracle e Java erano sostenitrici del cosiddetto modello «*thin*» (magro): semplici scatole multimediali prive di disco rigido, in grado di scaricare facilmente applicazioni dalla Rete ogni volta che si desiderasse. I paladini del «*fat*» (grasso) erano le imprese della vecchia guardia - Microsoft, Intel, Dell, Compaq - che volevano continuare a vendere i computer imbottiti di memoria e di software. Nel mondo dell'intrattenimento digitale la TV è *thin* e il PC rappresenta l'alternativa *fat*. Chi sarà il vincitore

In casa una varietà di interfacce permetterà di divertirsi e controllare il flusso in arrivo di d-TV, d-audio, d-video e dati, gestito centralmente e trasmesso in tutta l'abitazione con o senza fili.

dipenderà dalle stesse irrisolte questioni: dove devono essere memorizzati i file? La potenza e il controllo devono stare nelle mani del consumatore o della rete? Quanta complessità tollereranno i consumatori in cambio di maggiori funzioni?

Il PC ha molti vantaggi: permette di creare, memorizzare e condividere facilmente i file; le economie di scala hanno fatto precipitare i prezzi; e in un mondo di complicati standard TV in competizione, potrebbe avere senso adottare un generico PC programmabile in grado di gestirli tutti, piuttosto che acquistare una serie di periferiche TV. In effetti, il PC per l'intrattenimento potrebbe essere una TiVo Personal TV o una PlayStation2, riconfezionate in modo intelligente.

Il PC ha anche la capacità unica di produrre e ricevere trasmissioni tramite Internet, decretando il successo di stazioni radio online e di una industria in espansione formata da compagnie come IFilm e AtomFilms che distribuiscono film di registi indipendenti. Ha anche consentito a compagnie importanti come MTV e Time Warner (attraverso la consociata Entertaindom) di fornire contenuti che non si trovano altrove. Trailer di film come *Star Wars: la minaccia fantasma* e le riprese dal vivo del sito Web *Big Brother* della CBS (con telecamere accese 24 ore al giorno a spiare gli abitanti, tra loro sconosciuti, di una casa privata, un'esperienza replicata di recente anche in Italia con il *Grande Fratello* sul sito di Jumpy) sono alcuni tra i maggiori successi di Internet.

Connessioni a larga banda e potenziamento di Internet risolveranno gli inconvenienti che frenano lo sviluppo dell'intrattenimento digitale

Questo tipo di trasmissioni avrà un ruolo importante nell'intrattenimento digitale, ma non ne sarà il motore primario a causa della bassa risoluzione; video di qualità analoghi a quelli trasmessi in TV richiedono una banda molto più ampia di quella disponibile alla maggior parte degli utenti sui loro PC. Inoltre l'attuale architettura IP di Internet non è abbastanza robusta. Le trasmissioni risentono della congestione della rete e hanno problemi nel passare attraverso server e router non dimensionati per questo tipo di funzione. Alcune aziende, come Akamai, distribuiscono le trasmissioni più richieste su molti server dedicati, vicini agli utenti finali, ma questo non basta per fornire la qualità di servizio richiesta. La proliferazione di connessioni a larga banda e le iniziative per potenziare Internet, come IP versione 6, aiuteranno a risolvere alcuni di questi inconvenienti.

Un altro problema è dato da architetture e codec di software depositati come Windows Media, RealVideo e QuickTime. I produttori di hardware non vogliono realizzare sistemi basati su software che non siano standard aperti; i creatori di software dovranno adeguarsi affinché i loro prodotti funzionino insieme in modo convergente.

Se tutto ciò si realizzasse, un flusso MPEG-4 in arrivo a un PC tramite una connessione a larga banda sarebbe indistinguibile da quanto fornito da una TV via cavo; e sarebbe possibile memorizzare o modificare questi video e distribuire quelli fatti in proprio. Un ostacolo potrebbe però essere il PC stesso. Nonostante i successi, è ancora inaffidabile, a causa del complesso sistema operativo: una TV di scarsa qualità non si blocca all'improvviso, come capita anche ai migliori computer.

Tornando a casa

Potremmo ormai concludere che servono troppe tecnologie e troppi compromessi perché la convergenza non diventi un incubo per il consumatore. Ma l'introduzione del personal computer e di Internet ha visto difficoltà analoghe, e questo non ha impedito loro un folgorante successo.

A breve termine, la convergenza consisterà in una serie di apparecchiature separate, molte connesse a Internet, ma non necessariamente l'una all'altra. Gli apparecchi assumeranno via via funzioni comuni e diventeranno più potenti, fino a costituire reti domestiche wireless connesse a un server centrale che manterrà una connessione continua in larga banda con il resto del mondo tramite linee in fibra ottica o collegamenti via satellite. Vivremo in un mondo con molti apparecchi, molte reti e contenuti illimitati e disponibili in forme diverse, uniti da connessioni invisibili.

Come per le piattaforme, la modalità vincente di convergenza sarà caratterizzata da economie di scala per il consumatore, forse sostenuta da fusioni e alleanze di compagnie che porteranno a offerte più competitive. Più interessante del «come ci arriveremo», tuttavia, sarà il «cosa potremo fare» della convergenza quando l'avremo a disposizione. Ma la storia dimostra che, quando ai consumatori vengono offerte nuove scelte tecnologiche, le opzioni vincenti sono spesso diverse da quelle che chiunque avrebbe potuto immaginare.

PETER FORMAN e ROBERT W. SAINT JOHN hanno collaborato nel creare software di convergenza presso la Ligos Corp. alla fine degli anni novanta. Forman è presidente e direttore generale della Ligos di San Francisco, specializzata in tecnologia codec per video in tempo reale. Saint John è un produttore di video indipendenti e consulente multimediale a San Diego. La sua società, Nearly News Productions, si dedica alla produzione di video per videodischi, Internet e le future piattaforme d-video.

SYMES PETER D., *Video Compression*, McGraw-Hill, 1998.

SILBERGLEID MICHAEL e PESCATORE MARK J. (a cura), *The Guide to Digital Television*, Miller-Freeman, 1999.

COVELL ANDY, *Digital Convergence*, Aegis Publishing Group, 2000.

Sam's Digital Television Report (www.teleport.com/~samc/hdtv).

Consumer Electronics Association (www.digitaltelevision.com).

Guerre musicali

La distribuzione via Internet di audio digitale di qualità si sta rapidamente perfezionando, ma le battaglie legali - che stabiliranno precedenti giudiziari - sono appena iniziate

di Ken C. Pohlmann

La tecnologia che sta dietro alla musica digitale si sta sviluppando a una velocità che l'industria non può controllare. Anzi, le case discografiche si stanno arrampicando sugli specchi per far fronte a nuovi formati e modalità di distribuzione che minacciano la loro egemonia nell'offrire musica registrata. La crescente popolarità di Internet come fonte di registrazioni ha innescato cambiamenti irreversibili nel modo in cui il pubblico si aspetta di vivere la musica. Concetti «futuristici» come musica su richiesta, l'accesso ai cataloghi delle case discografiche e la possibilità di circondarsi di brani musicali gratuitamente sono già realtà. La «musica come dato» sta creando un nuovo paradigma per la produzione e la distribuzione di registrazioni che lascia perplessi gli stessi autori. E la sfida fa presagire quelle, ancora maggiori, che riguarderanno film e TV digitali. E, anzi, tutte le forme di intrattenimento digitale.

DigitalVision

DigitalVision

Guerre musicali

La distribuzione via Internet di audio digitale di qualità si sta rapidamente perfezionando, ma le battaglie legali - che stabiliranno precedenti giudiziari - sono appena iniziate

di Ken C. Pohlmann

La tecnologia che sta dietro alla musica digitale si sta sviluppando a una velocità che l'industria non può controllare. Anzi, le case discografiche si stanno arrampicando sugli specchi per far fronte a nuovi formati e modalità di distribuzione che minacciano la loro egemonia nell'offrire musica registrata. La crescente popolarità di Internet come fonte di registrazioni ha innescato cambiamenti irreversibili nel modo in cui il pubblico si aspetta di vivere la musica. Concetti «futuristici» come musica su richiesta, l'accesso ai cataloghi delle case discografiche e la possibilità di circondarsi di brani musicali gratuitamente sono già realtà. La «musica come dato» sta creando un nuovo paradigma per la produzione e la distribuzione di registrazioni che lascia perplessi gli stessi autori. E la sfida fa presagire quelle, ancora maggiori, che riguarderanno film e TV digitali. E, anzi, tutte le forme di intrattenimento digitale.

L'ironia sta nel fatto che musicisti, case discografiche e consumatori erano tutti perfettamente soddisfatti dei compact disc e dei loro lettori, prodotti a basso costo, affidabili e comodi da usare. L'intercambiabilità dei dischi tra computer e stereo ha reso la famiglia CD un supporto audio quasi ideale. Ma la tecnologia non si ferma mai. La battaglia sulla distribuzione di musica in rete, con la battaglia legale di Napster a fare da sfondo, riguarda il modo in cui il segnale audio è prodotto e ascoltato e gli espedienti che permettono di eludere la protezione dei diritti d'autore.

La registrazione digitale campiona un segnale audio e salva l'ampiezza di ciascun campione come «parola» digitale. La combinazione di frequenza di campionamento e lunghezza della parola determina la qualità del suono finale: più alta è la frequenza e migliore è la risposta; maggiore è la lunghezza della parola e minore è il rumore. Gli standard industriali per i CD stabiliscono una frequenza di campionamento di 44,1 chilohertz (kHz) e una lunghezza di parola di 16 bit.

Dennis Cook AP Photo

I musicisti Roger McGuinn dei Byrds (*a sinistra*) e Lars Ulrich dei Metallica (*al centro*) si scagliano contro Hank Barry per il suo sito per lo scambio di brani musicali, Napster, di fronte a una Commissione del Senato statunitense riunitasi lo scorso luglio per esaminare il problema della violazione del diritto d'autore.

La velocità risultante, di 1,41 Megabit al secondo (Mbps) garantisce un'adeguata fedeltà, ma non permette una trasmissione veloce su Internet. A seconda del traffico in rete, una traccia di CD della durata di tre minuti può richiedere 90 minuti per essere scaricata con un modem da 56K. Una soluzione è ridurre la frequenza di campionamento, ma la fedeltà peggiora. Un'idea più astuta è quella di ridurre la lunghezza della parola. Così si aumenta il rumore, ma esistono metodi di codifica percettiva che permettono di abbreviare notevolmente la lunghezza della parola con buoni risultati. Il codificatore ignora le parti del segnale musicale digitale che non sono udibili e riduce i dati necessari per trasferire i suoni. A seconda della velocità in bit, il risultato finale può essere quasi indistinguibile dall'originale o inascoltabile.

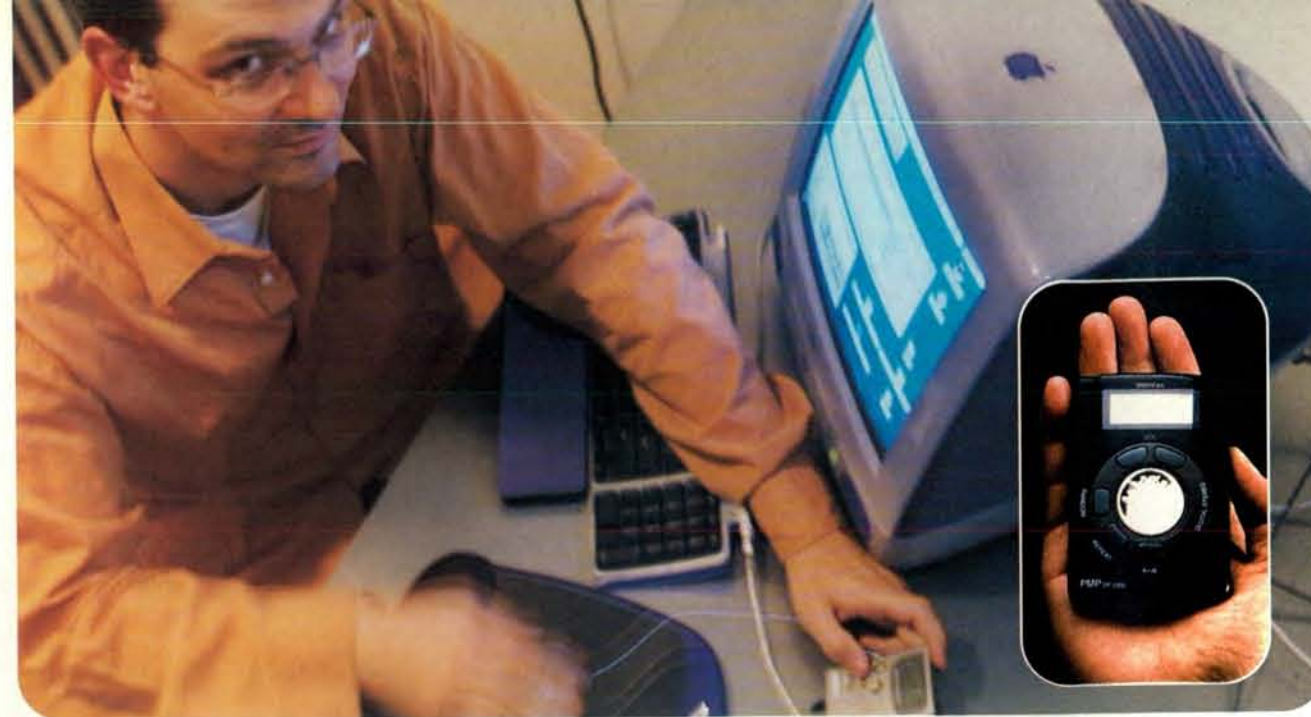
La famiglia di algoritmi di codifica percettiva usati nell'industria audio è stata ideata dal Moving Picture Experts Group (MPEG). Uno degli standard MPEG definisce un codificatore, chiamato MP3, che usa velocità stereo da 64 a 320 chilobit al secondo (kbps). Una velocità di 128 kbps dà un rapporto di compressione di 11:1 rispetto a una registrazione CD e permette trasmissioni abbastanza rapide su Internet. Una velocità inferiore introduce distorsioni percettibili, mentre velocità superiori ai 192 kbps dovrebbero dare un risultato identico all'originale. Con gli attuali modem telefonici simili velocità sono eccessive, ma diventeranno la norma non appena si diffonderanno le connessioni a larga banda. Qualunque sia la velocità, MP3 riduce i file di musica digitale a dimensioni più maneggevoli. A 128 kbps, la stessa traccia di tre minuti di registrazione richiederebbe circa otto minuti per essere trasferita con un modem da 56K; e un disco rigido da 20 gigabyte potrebbe contenere 300 album digitali, trasformando un PC in un jukebox digitale.

La diffusione di MP3 ha avviato cambiamenti radicali nell'industria musicale. L'utente può ora trasformare i CD in file MP3 (con una procedura chiamata *ripping*) usando programmi detti MP3 ripper o CD grabber. Dopodiché può rendere disponibile a tutti il file così trasformato sul suo computer o sito Web.

Impazzire per MP3

E qui cominciano i guai. La conversione di un CD in MP3 non è illegale se fatta per uso personale; ma ridistribuire musica pubblicamente senza l'autorizzazione di chi detiene i diritti d'autore significa violare le leggi sul copyright. Organizzazioni come la Recording Industry Association of America (RIAA) sostengono che l'invio di file MP3 costituisce un'infrazione al copyright, e hanno preso posizione contro grandi siti Web per lo scambio di MP3, come il già citato Napster. Utilizzando il software Napster, liberamente scaricabile, si possono localizzare canzoni MP3 sui dischi rigidi di altri utenti collegati a Napster e copiarle gratis e rapidamente, se si ha una connessione modem veloce. Poiché le copie risiedono in migliaia di siti Web che vanno e vengono attraverso le connessioni a Napster, è difficile risalire al colpevole. Così la RIAA e alcune band come i Metallica hanno fatto causa a Napster per concorso in violazione del copyright.

Naturalmente, un'idea brillante ne genera un'altra. Gnutella, uno dei primi eredi di Napster, consente a due utenti di scambiarsi file MP3 direttamente su Internet, senza passare da un server centrale. Gnutella è stato realizzato dalla Nullsoft ed è facilmente scaricabile. Nullsoft è di proprietà di America Online (AOL), che intende fondersi con Time Warner, proprietaria di Warner Music e notoriamente critica nei confronti di MP3. Ovviamente il sito di Gnutella è stato giudicato un «progetto freelance non autorizzato» e chiuso dai suoi stessi amministratori. Tuttavia un migliaio di copie era già in circolazione: il genio ha lasciato la lampada, e cloni di Gnutella hanno cominciato a comparire ovunque.

La proliferazione di file MP3 illegali e di programmi come Napster e Gnutella mostra l'efficienza della distribuzione in Internet di musica digitale e la difficoltà di controllarla. Nonostante le guerre giudiziarie, i produttori di hardware stanno

Lisa Pines; Newsmakers (*riquadro*)

iniziando ad adottare lo stesso formato. Alcuni nuovi CD player leggono dischi contenenti file MP3, oltre ai normali CD, e lettori MP3 portatili come Rio e Rave sono già molto diffusi. Hanno schede di memoria come quelle usate nelle macchine fotografiche digitali, che immagazzinano i file scaricati da un PC. Un lettore con 64 megabyte di memoria contiene circa 66 minuti di musica codificata al buon livello qualitativo di 128 kbps.

Reti decentralizzate in cui ogni risorsa è disponibile a ogni altra senza bisogno di un server, come Freenet, fanno ancora meglio di Gnutella, permettendo di trasferire anonimamente un file da PC a PC e rendendo pressoché impossibile identificare chi lo invia o chi lo scarica. Cause legali, ingiunzioni e annullamenti di sentenze infuriano intorno a Napster e agli altri siti di scambio MP3 da circa un anno. La sfida per l'industria discografica è come prevenire la copia non autorizzata pur continuando a offrire un prodotto Internet che il consumatore sia disposto a pagare. Un noto sito di download, MP3.com, ha trovato una soluzione accordandosi con EMI, Sony Music, Warner Music Group e BMG Entertainment e ottenendo il permesso di distribuire musica digitale di queste case discografiche.

La sicurezza e la questione dei DVD

L'industria della musica ha risposto alla popolarità dell'MP3 sviluppando specifiche SDMI (Secure Digital Music Initiative) per migliorare il sistema di protezione SCMS (Serial Copy Management System) utilizzato nell'attuale formato CD. SCMS è debole: un solo bit stabilisce se un disco può essere copiato o no. Questo scoraggia la pirateria digitale spicciola, ma in un CD sottoposto a

La possibilità di scaricare gratuitamente file musicali, attraverso siti Web come Napster, su computer o lettori MP3 portatili come Rio (*nel riquadro*) ha provocato una serie di contromisure per proteggere artisti e case discografiche.

Bryan Christie

Copiare musica tramite Internet è facile e gratuito con l'aiuto di MP3 e del software Napster, disponibile gratis online.

Dove si trova il software per lo scambio di MP3

www.napster.com
il più celebre programma per lo scambio di file musicali

www.gnutella.com
permette lo scambio di file senza la mediazione di un server

www.freenet.com
l'uovo di Colombo: lo scambio di file musicali tra utenti è del tutto anonimo

ripping il bit che impedisce la copia non viene riportato. Nel protocollo SDMI i dati musicali saranno crittografati e autenticati in modo tale che non sia possibile convertire una traccia CD in un file MP3 senza la chiave di decodifica.

Inoltre gli apparecchi SDMI-compatibili non leggerebbero file SDMI copiati illegalmente. Il protocollo permette anche di imprimere nei file una filigrana elettronica (*watermark*), in modo da poter rintracciare le copie illegali fino all'origine. I file di musica digitale possono essere cifrati e decrittati senza che la fedeltà ne risenta, ma il watermarking inserisce un codice nel segnale audio, e bisogna stare attenti per evitare che diventi un fastidioso rumore. Questo è importante perché le case discografiche prevedono che in un prossimo futuro i clienti potranno collegarsi, ascoltare brani musicali e quindi acquistare e scaricare quelli che avranno scelto su lettori MP3 oppure riversarli sui propri CD registrabili. Oltre 200 società di diversi settori hanno già sottoscritto l'uso di SDMI.

I sostenitori di SDMI sperano di evitare la disastrosa gaffe che ha portato a violare i videodischi digitali. I dischi DVD-Video sono cifrati con CSS (Content Scrambling System). Per decodificare le informazioni video e audio occorre una chiave di 40 bit e ciascun produttore ha la propria. Di conseguenza, ogni DVD-Video ha 400 chiavi da 40 bit risiedenti sul disco. Tutti i concessionari della tecnologia DVD-Video avrebbero dovuto cifrare le proprie chiavi, ma uno non l'ha fatto. Un gruppo di adolescenti norvegesi, il MoRE (Masters of Reverse Engineering), ha effettuato il *reverse engineering* [processo che porta a capire il funzionamento di un dispositivo senza l'aiuto di documentazione, N.d.T.] del lettore DVD-Video della Xing Technologies, decodificandone la chiave. Poi MoRE è riuscito a scoprire più di 170 chiavi, andando per tentativi. Anche se SDMI eviterà questi passi falsi, nell'anarchia di Internet qualunque progetto di questo tipo è visto come una provocazione per gli hacker.

La sfida intorno a MP3 non è altro che l'antipasto per il futuro della TV digitale e del cinema online

La vicenda dei file MP3 lancia senza dubbio una sfida allo *status quo*. I sostenitori di Napster, Gnutella, Freenet e simili auspicano la fine dell'era in cui poche grandi compagnie dominano il mercato della musica. Immaginano una democratizzazione della musica, in cui le piccole etichette saranno competitive in un mercato virtuale fondato sulla funzione di download e migliaia di artisti indipendenti potrebbero vendere la propria musica direttamente ai consumatori.

Un'altra tecnica di trasmissione, il flusso di dati in tempo reale, ha suscitato meno polemiche. In questo metodo speciali algoritmi riducono la dimensione dei file e la velocità in bit in modo che la musica venga riprodotta alla stessa velocità con cui viene ricevuta. Così funzionano le stazioni radio Internet e Webcast. Gli ascoltatori si collegano e scaricano il file trasmesso in un lettore buffer, messo in rete gratuitamente da aziende come RealNetworks. Nei casi migliori, la musica viene riprodotta dal buffer via via che arriva, anche se sono ancora comuni interruzioni e ripartenze.

La bassa velocità in bit di questa modalità, detta *streaming*, comporta una bassa fedeltà e quindi essa non è vista come una minaccia dalle case discografiche. Anzi, è diventata uno strumento prezioso per etichette e artisti indipendenti che vogliono presentare i loro lavori in anteprima.

AAA cercasi: nuovo modello di mercato

MP3 fa notizia, ma l'industria discografica sta anche perfezionando i propri media tradizionali. L'imminente formato DVD-Audio, che dovrebbe ricalcare il successo del DVD-Video, evita la riduzione dei dati a favore di una codifica ad alta fedeltà senza compromessi. Un disco DVD-Audio potrebbe essere codificato con frequenza di campionamento di 192 kHz e lunghezza di parola di 24 bit, superando di gran lunga le prestazioni di un CD. Resta da vedere se l'ascoltatore medio saprà apprezzare la migliorata qualità del suono, e se vorrà pagare per averla. Intanto i nuovi lettori leggono già sia i DVD-Video sia i DVD-Audio.

Il DVD-Audio è un'evoluzione della tecnologia secondo uno schema classico, accettabile per le aziende discografiche e di hardware. Ma il pubblico imporrà all'industria di promuovere l'intrattenimento digitale on-line. Con l'introduzione della larga banda e dei servizi Internet wireless, le compagnie saranno costrette a esplorare nuovi modelli di mercato. Le opzioni comprenderanno probabilmente l'acquisto on-line, l'ascolto a pagamento e l'abbonamento mensile con pagamenti differenziati a seconda del numero di ascolti. O forse l'accesso alla musica digitale sarà gratuito e, come nelle televisioni commerciali, gli introiti deriveranno da pubblicità e sponsorizzazioni.

La tecnologia che rivoluzionerà il nostro futuro audio è già disponibile. La trasmissione diretta via satellite verso automobili dotate di piccole antenne inizierà quest'anno; la fusione di telefoni cellulari e Internet sta profondamente cambiando le telecomunicazioni; e il download di musica digitale sembra davvero un processo inarrestabile.

KEN C. POHLMANN dirige il programma di ingegneria musicale dell'Università di Miami ed è autore di *Principles of Digital Audio* (McGraw-Hill, 2000). Collabora a «Sound & Vision» e a «Mobile Entertainment». All'articolo ha collaborato il giornalista freelance Wes Phillips.

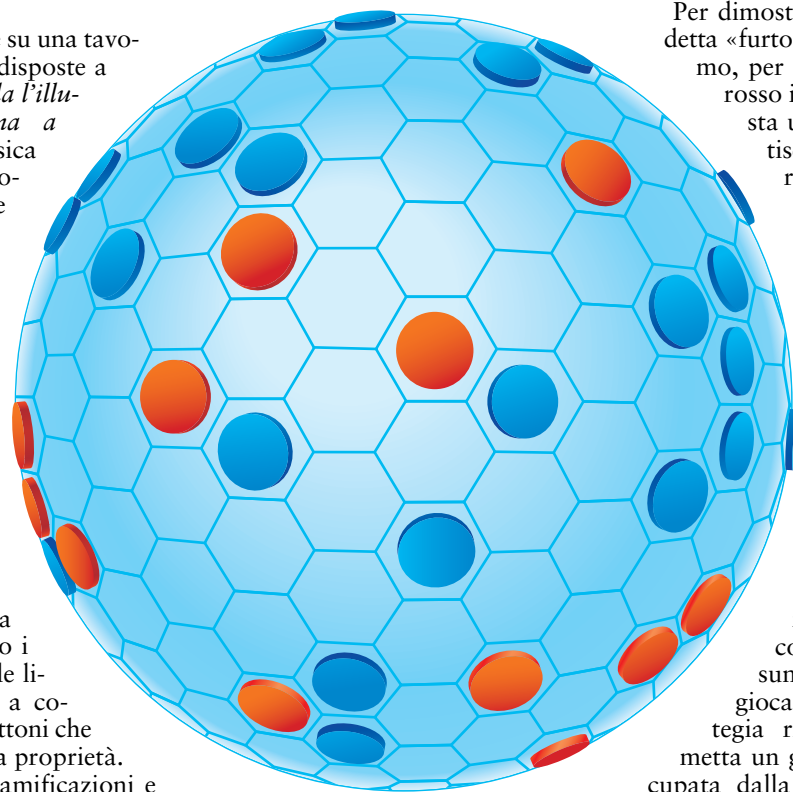
FRIES BRUCE e FRIES MARTIN, *The MP3 and Internet Audio Handbook*, TeamCom, 2000.
TAYLOR JIM, *DVD Demystified*, seconda edizione, McGraw-Hill, 2000.
www.mpeg.org; www.dvdforum.org; www.sdmi.org

di IAN STEWART

Connessioni vincenti

Stanchi dei soliti giochi da tavolo? Se è così, dovreste provare con l'Hex. È coinvolgente quanto i giochi elettronici e molto più stimolante per il cervello. Cameron Browne, un programmatore di Brisbane, in Australia, ha recentemente pubblicato *Hex Strategy: Making the Right Connections* (A. K. Peters, 2000), il primo libro che tratti in modo esauriente l'Hex e le strategie per vincerlo. Sicuramente un libro perfetto per chiunque si occupi di matematica ricreativa.

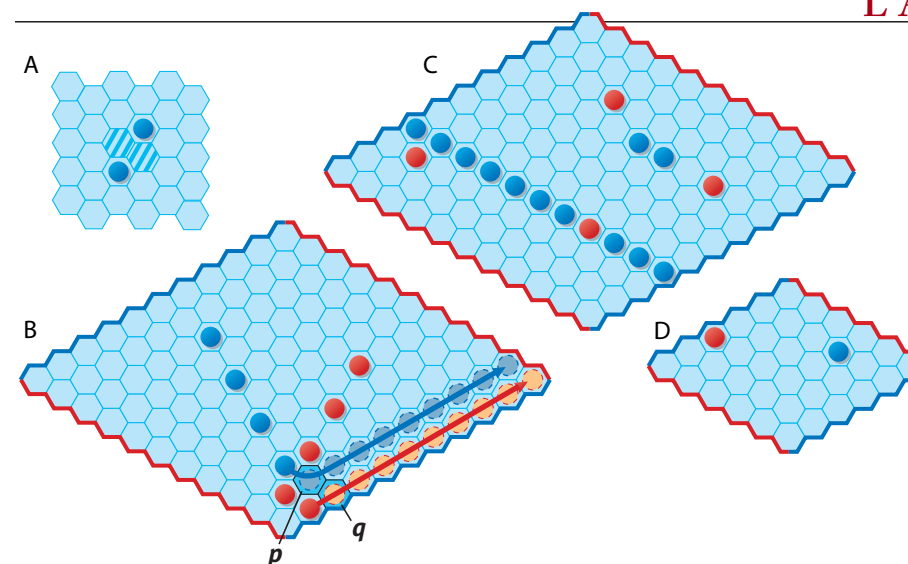
L'Hex si gioca in due su una tavola di caselle esagonali disposte a forma di rombo (*si veda l'illustrazione della pagina a fronte*). La tavola classica è 11 per 11. Ciascun giocatore «possiede» due lati opposti e le quattro caselle d'angolo sono in comune. I giocatori hanno anche a disposizione un certo numero di gettoni, che nelle illustrazioni di questo articolo sono rossi o azzurri. Le regole sono sorprendentemente semplici. I giocatori lanciano una moneta per decidere chi ha la prima mossa e poi, a turno, mettono i loro gettoni sulle caselle libere. Vince chi riesce a costruire una catena di gettoni che colleghi i due lati di sua proprietà. La catena può avere ramificazioni e anelli; basta che i gettoni formino un percorso connesso che vada da un lato a quello opposto. Sembra facile, ma l'apparenza inganna: l'Hex è un gioco di grande sottigliezza.

L'inventore dell'Hex è Piet Hein, matematico e poeta danese. Il gioco, chiamato dal suo autore Polygon, apparve per la prima volta il 26 dicembre 1942 sul quotidiano danese «Politiken». Venne reinventato nel 1948 in modo indipendente dal matematico John Nash, quando era studente alla Princeton University. Nash ottenne in seguito il premio Nobel per l'economia per i suoi lavori sulla teoria dei giochi. A Princeton il gioco era noto come Nash, o a volte John, e spesso veniva giocato sulle piastrelle esagonali dei bagni. Nel 1957 Martin Gardner scrisse un articolo per «Scientific American» a proposito dell'Hex, e il gioco divenne una mania che travolse i dipartimenti di matematica di tutto il mondo.

Si può giocare a palla in modo insolito usando una sfera tassellata con esagoni e pentagoni. (I 12 pentagoni della sfera si trovano lungo il margine di questa figura, e non si possono quindi vedere da questa angolazione.) In questa variante del gioco Hex, vince il primo giocatore che riesce a circondare una casella (libera o occupata dall'avversario).

Illustrazioni di Bryan Christie

Basta una semplice analisi per capire meglio il gioco. Il numero di mosse è finito - al massimo 121 su una tavola 11 per 11 - e se un giocatore realizza una catena connessa, necessariamente l'altro non può fare altrettanto. È quindi intuitivo che alla fine ci deve essere un vincitore: si può impedire all'avversario di realizzare una catena solo realizzandola per primo. Si può anche dimostrare che, in una partita giocata al meglio, la vittoria è sempre del giocatore che ha la prima mossa.

Per dimostrarlo si usa una tecnica detta «furto di strategia». Supponiamo, per ipotesi, che il giocatore rosso inizi per primo e che esista una strategia che garantisce la vittoria al giocatore azzurro. Se così fosse, il rosso potrebbe scoprire quella strategia e utilizzarla per battere l'azzurro. Supponiamo che il rosso, dopo aver messo il primo gettone sulla tavola, dimentichi immediatamente la sua mossa d'apertura e finga che sia l'azzurro ad avere la prima mossa. Qualunque sia questa mossa dell'azzurro, il rosso gioca la risposta corretta secondo la presunta strategia del secondo giocatore. A volte quella strategia richiederà che il rosso metta un gettone nella casella occupata dalla sua mossa d'apertura «dimenticata», ma questo non è un problema: dato che uno dei gettoni rossi occupa già la casella, il giocatore sta semplicemente attendendosi alla strategia. Fa quindi una nuova mossa, su una casella libera, e questa diventa la nuova mossa «dimenticata».

Continuando sulla stessa linea, il rosso può forzare la vittoria. Ma ora ci troviamo in una situazione ben strana: rubando a questo modo la presunta strategia del secondo giocatore, il rosso ha giocato per primo e ha vinto, indipendentemente dalle mosse dell'azzurro. L'unica possibilità di uscire da questo *impasse* logico è concludere che non esiste alcuna strategia vincente per il secondo giocatore. E dato che il gioco è finito e uno dei giocatori deve necessariamente vincere, ciò significa che deve esistere una strategia vincente per il primo giocatore.

A prima vista, questa dimostrazione ne toglie valore al gioco, in quanto entrambi i giocatori sanno chi dovrebbe vincere in caso di gioco perfetto. Ma la dimostrazione non ci dice quale sia la strategia vincente per il primo giocatore. In effetti, la tavola di dimensioni più grandi per cui si conosca quella strategia è 7 per 7; anche solo su una tavola 8 per 8, il primo giocatore sa che dovrebbe vincere, in linea di principio, ma non ha la più pallida idea di cosa fare per riuscirci. E se, nonostante ciò, il gioco continua a sembrare iniquo per il secondo giocatore, molti introducono una regola opzionale: dopo che il primo giocatore ha fatto la sua mossa d'apertura, il secondo giocatore può decidere di sostituire quel gettone con uno dei suoi, anziché occupare una casella libera.

Dato che un'analisi completa dell'Hex richiederebbe cinque anni di questa rubrica, mi concentrerò su due sole caratteristiche. La prima, che risulta rapidamente evidente a chiunque provi a giocare, è che le caselle non devono essere necessariamente occupate per svolgere un ruolo strategico. Nell'illustrazione A qui sopra si vede un ponte, ossia una situazione in cui due caselle non adiacenti occupate dall'azzurro sono separate da due caselle intermedie che confinano con entrambe le caselle azzurre. Se queste caselle intermedie non sono occupate dal rosso, le due caselle azzurre sono in realtà già connesse in quanto, se il rosso occupa una delle due caselle intermedie, l'azzurro può occupare subito l'altra. I giocatori di Hex spesso tentano di costruire catene di ponti attraverso la tavola. Un ponte, tuttavia, non è affatto imbattibile: un ponte azzurro può essere sconfitto se il rosso fa in modo di occupare una delle caselle intermedie mentre contemporaneamente minaccia una mossa vincente in un altro punto della tavola. Dato, però, che la cosa non è facile, è sempre meglio impedire all'avversario di costruire troppi ponti.

La strategia base per l'Hex consiste nel costruire ponti da un lato della tavola a quello opposto. Un giocatore costruisce un ponte (A) occupando due caselle non adiacenti separate da due caselle intermedie (tratteggiate) *che confinino con entrambe le caselle occupate. Strategie più avanzate prevedono la costruzione di scale (B). In questo esempio, il rosso vince lo scambio di mosse centrato sulle scale. Infine, due problemi per i lettori (C e D). Quale casella può occupare il rosso per garantirsi la vittoria?*

Un utile principio generale afferma che la catena costruita da un giocatore ha forza pari a quella del suo collegamento più debole. Se il vostro avversario può attaccare con buone possibilità di successo qualche zona della catena che state costruendo, allora è meglio cercare di rinforzare il vostro collegamento più debole o attaccare quello del vostro avversario. Per nascondere le vostre intenzioni, è spesso consigliabile mirare ai punti deboli dell'avversario partendo da una certa distanza.

Strategie più avanzate prevedono la costruzione di scale, che compaiono quando un giocatore cerca di stabilire una connessione con un lato della tavola. Nell'illustrazione B qui sopra si vede l'inizio di una scala, con l'azzurro che deve muovere. Egli non ha altra scelta che occupare la casella *p*; in caso contrario, il rosso può forzare la vittoria. Per lo stesso motivo, il rosso deve poi occupare la casella *q*. Se l'azzurro persiste nella ricerca di una connessione con lo stesso lato (e per diverse mosse è obbligato a giocare in questo modo, pena la sconfitta), allora il rosso è costretto a proseguire nel blocco, e lungo il lato finiscono con l'estendersi due catene parallele, l'una azzurra e l'altra rossa. L'azzurro non si è accorto, però, che se il gioco continua a questo modo il rosso vincerà. È importante prevedere in anticipo l'eventuale comparsa di scale, e bloccare l'avversario prima che ne produca una. Se l'azzurro avesse piazzato in precedenza uno dei suoi gettoni vicino al lato, avrebbe vinto lo scambio basato sulle scale.

Oltre a occuparsi di questi argomenti, *Hex Strategy* prende in considerazione una grande quantità di varianti del gioco base. Per esempio, il gioco Y utilizza una tavola triangolare e un giocatore vince formando una catena che tocchi tutti e tre i lati. Come nell'Hex base, non si conoscono strategie vincenti per Y, tranne che per tavole molte piccole. Si può addirittura giocare a Hex su una sfera tassellata con esagoni e pentagoni (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Vince il primo giocatore che riesca a circondare una casella (libera o occupata dall'avversario).

Per finire, propongo due problemi su cui i lettori possono ragionare a loro agio. Il primo (*si veda l'illustrazione C*) è tratto dall'articolo originale di Hein sul gioco; la sfida sta nel trovare l'unica casella che il rosso può occupare per garantirsi la vittoria. Se il problema è troppo semplice, provate con quello ideato dal programmatore Bert Enderton di Pittsburgh per una tavola 6 per 6 (*si veda l'illustrazione D*). Anche in questo caso si tratta di trovare la casella che assicuri la vittoria al rosso. ❑